

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**TESIS**

**IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA BARKHAUSEN COMO  
UNA PRUEBA NO DESTRUCTIVA PARA DETECCIÓN DE  
MARTENSITA REFORMADA EN FLECHAS DE TRANSMISIÓN**

**PRESENTA**

**JORGE OBDULIO RIOS NAVA**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**NOVIEMBRE, 2016**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**TESIS**

**IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA BARKHAUSEN COMO  
UNA PRUEBA NO DESTRUCTIVA PARA DETECCIÓN DE  
MARTENSITA REFORMADA EN FLECHAS DE TRANSMISIÓN**

**PRESENTA**

**JORGE OBDULIO RIOS NAVA**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN,**

**NOVIEMBRE 2016**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“Implementación de tecnología Barkhausen como una prueba no destructiva para detección de martensita reformada (White layer) en flechas de transmisión”** realizada por el estudiante Jorge Obdulio Rios Nava, con matrícula 1507168, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

COMITÉ DE TESIS



---

Dr. Martín **Castillo Morales**  
Asesor



---

Dra. Tania **P. Berber Solano**  
Revisor

---

M.C. Arheli Zaid Rodríguez Díaz  
Revisor

---

Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Posgrado

# DEDICATORIA

Principalmente a Dios por darme salud y poder realizar este trabajo.

Especialmente a mi padre Jorge Obdulio Ríos Méndez y madre Nelva Nava Garza que me han dado las herramientas y fortaleza para seguir adelante en mis triunfos y fracasos.

A mis hermanos por el apoyo brindado a lo largo de mi vida.

A mi novia Nayeli Moran Aguirre que ha sido pieza fundamental de mis logros.

A esas personas que ya no están físicamente conmigo pero que desde arriba me guían.



# AGRADECIMIENTOS

A Sistemas Automotrices de México S.A. de C.V. por la oportunidad brindada de continuar con mis estudios y superación en el aspecto profesional y personal.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León en conjunto con el programa CONACyT por el apoyo brindado en mis estudios de postgrado a si mismo agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, a la Dra. Tania Berber y a mi asesor académico Dr. Martin Castillo por sus consejos brindados.

A mis asesores industriales M.C. Héctor Leobardo Torres García y M.C. Arheli Zaid Rodríguez Díaz por el apoyo, comprensión y confianza brindada durante este proceso.

Al Ing. Ismael Garcia por haberme dado la confianza y la oportunidad de pertenecer a este gran equipo de trabajo de Innovación y permitirme desarrollarme profesionalmente durante este proyecto.

Al departamento de tecnología de materiales: M.C. Javier López, M.C. Marco López, M.C. Juan José Ramírez Natera, Ing. Cecilio Cannavaccioulo Díaz, Dr. Rene cerda por su apoyo y consejos brindados a lo largo de este proyecto.

Al Ing. Mario Cabriales y el equipo del Laboratorio de Ing. de Materiales por el apoyo brindado durante las pruebas y validaciones realizadas durante este proyecto.

A mi familia por alentarme a seguir adelante y estar apoyándome en mis proyectos profesionales y personales.

# ÍNDICE TEMÁTICO

<b>Capítulo 1 Problema de Investigación.....</b>	<b>3</b>
1.1. Justificación .....	3
1.2. Introducción al Problema.....	5
1.3. Hipotesis de Investigación .....	8
1.4. Objetivos de Investigación.....	9
<b>Capítulo 2 Marco Teórico .....</b>	<b>10</b>
2.1. Pruebas No destructivas .....	
2.2. Efecto Barkhausen .....	18
2.3. Flechas de Transmisión .....	21
2.4. Transformación Martensítica .....	22
2.5. Los sensores en los procesos de Manufactura .....	27
2.6. Aplicaciones del Sensor Barkhausen .....	28
2.7. Importancia .....	30
2.8. Propiedades electromagnéticas de los materiales .....	31
<b>Capítulo 3 Experimentación y Resultados .....</b>	<b>34</b>
3.1. Introducción a la experimentación.....	34
3.2. Metodología .....	34
3.3. Experimentos y Resultados Metalografías.....	37
3.4. Experimentos y Resultados Cámara Termo-gráfica.....	47
3.5. Experimentos y Resultados Ruido Barkhausen.....	50
3.6. Experimentos y Resultados Gradientes de Dureza RC.....	52
<b>Capítulo 4 Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>57</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>59</b>
<b>Listado de Tablas.....</b>	<b>62</b>

## RESUMEN

Este trabajo pretende abrir puertas a los estudios de pruebas no destructivas (PND) y particularmente al método Barkhausen ya que en la actualidad este fenómeno no ha sido estudiado ni desarrollado por completo y se pretende demostrar la viabilidad de esta nueva línea de investigación enfocada al desarrollo de sistemas de evaluación no destructivas de los materiales.

En este proyecto se reporta el desarrollo de un sistema de medición de ruido Barkhausen en aceros carburizados. El cual con ayuda de un sensor Barkhausen se midió la cantidad de impurezas detectadas en la pieza de trabajo (flecha de transmisión).

Esta tecnología sienta las bases para el desarrollo de investigaciones relacionadas con el ruido Barkhausen como herramienta para la caracterización y evaluación de materiales. Este fenómeno puede dar información en la interacción entre las paredes de dominio del mismo material y las configuraciones de esfuerzos o la composición microestructural.

Este proyecto toma una perspectiva en la influencia de las configuraciones de esfuerzos y la composición microestructural y cómo ésta se refleja en las señales de ruido Barkhausen. Estas señales pueden ser analizadas después usando una variedad de parámetros para analizar otros componentes. Concurrentemente, los esfuerzos residuales, dislocaciones y composiciones microestructurales juegan un rol importante en el ruido Barkhausen investigado y es de importancia agregar que este fenómeno es competitivo en las (PND) para materiales ferromagnéticos.

La caracterización microestructural de materiales por la evaluación de (PND) es esencial para la evaluación del tratamiento térmico inicial y la posterior degradación en la microestructura y las propiedades mecánicas bajo entorno de servicio.

La exposición a altas temperaturas, la carga estática y cíclica, etc., es el resultado de la degradación microestructural, fluencia y daños por fatiga. Por lo tanto la Microscopía convencional es una técnica que no brinda la

información global sobre los cambios en todo el componente. Técnicas como la microscopía electrónica de transmisión (TEM), que dan detalles más finos ocupan un periodo de tiempo mayor y también son no susceptibles para la evaluación en línea de los componentes. Técnicas avanzadas ECM como la atenuación ultrasónica y mediciones de velocidad, las técnicas de aniquilación de positrones, la microscopía acústica, el ruido Barkhausen, etc. han demostrado su viabilidad para la caracterización de microestructuras, fluencia y daños por fatiga.

# **CAPÍTULO 1.- PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.**

## **1.1.-JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad el acero es uno de los bienes industriales más importantes a nivel mundial. Ya que es utilizado ampliamente para la fabricación de estructuras de alto esfuerzo en diversas ramas de la vida tales como: la petrolera, ferroviaria, construcción, automotriz, entre otras. La detección de defectos en el acero es de vital importancia ya que se pueden prevenir pérdidas económicas y sobre todo humanas. La aplicación del acero en diversas áreas de la industria se debe a que este material posee buena plasticidad, elasticidad y alta resistencia mecánica. La detección de defectos en el acero mediante evaluación de pruebas no destructivas (PND) es un tema que ha generado un interés en los últimos años.

La técnica de medición de ruido Barkhausen en aceros es un método el cual puede estimar desde defectos microestructurales hasta esfuerzos residuales en las estructuras del acero. En este proyecto se desarrolla un sistema de medición a partir de ruido Barkhausen en flechas de transmisión (acero) a través de un sensor Barkhausen para la detección de un defecto metalúrgico que se da en el proceso de rectificado en duro llamado martensita reformada ó también conocida como “capa blanca”.

En la actualidad existe una necesidad tecnológica para la inspección de éste fenómeno mencionado anteriormente mediante una (PND) y se pretende buscar qué impacto se refleja en aplicar este método en una línea de producción. La rentabilidad de solo retirar de la línea de producción los elementos deficientes y la posibilidad de que ocurran fallas en las piezas cuando estén en operación son algunos beneficios que proporcionan las (PND).

Las (PND) mediante ruido Barkhausen son únicos ya que utilizan las propiedades magnéticas del material y pueden ser empleados para detectar defectos en la estructura del material.

Este tema de tesis pretende demostrar que tan fiable y viable es aplicar este fenómeno de Ruido Barkhausen en las flechas de transmisión ya que es una de las nuevas líneas de investigación y la empresa SISAMEX está interesado en aplicar este método en línea de producción.

El Ruido Barkhausen ha sido estudiado por décadas en una variedad de materiales magnéticos y en diferentes situaciones. Sin embargo, sólo recientemente y debido a los importantes avances técnicos y teóricos, fue posible comenzar un estudio sistemático que lo relacionara con cambios en las propiedades de los materiales. Esto indujo el desarrollo del método de medición del Ruido Barkhausen como una (PND) en materiales ferromagnéticos.

Los métodos magnéticos mediante (PND) son únicos y de gran utilidad ya que utilizan las propiedades magnéticas del material y pueden ser empleados para: detectar defectos en la estructura del acero (capa blanca de martensita) y evaluar propiedades magnéticas del material. Por lo tanto si la capa blanca de martensita es indeseable hasta cierto punto, entonces es necesario encontrar un método no destructivo para identificar la misma.

Esta tecnología pretende abrir puertas a los estudios de (PND) ya que en la actualidad este fenómeno no ha sido estudiado ni desarrollado por completo y se pretende demostrar la viabilidad de este equipo.

Existe una necesidad tecnológica para la inspección de martensita reformada mediante una (PND) y se pretende buscar qué impacto se refleja en aplicar este método en una línea de producción.

Actualmente se tienen métodos destructivos para la evaluación de martensita reformada y esto ha sido causante de mucho desperdicio y dinero en la compañía.

Este defecto metalúrgico aparece en los procesos de maquinado en duro y ha generado impacto negativo en la compañía. El torneado y rectificado en duro son procesos competitivos finales en líneas de producción de flechas de transmisión, muñones, engranes, levas, piñones, etc. Estos procesos inducen

esfuerzos residuales y esto causa un efecto de rendimiento en los componentes tales como la vida útil a la fatiga y la optimización del proceso.

El torneado en duro con una herramienta desgastada genera una transformación en la superficie llamada “capa blanca de martensita”. Esta transformación genera esfuerzos de tensión en la superficie de la pieza, pero se cambian a compresión cuando la profundidad aumenta y por ultimo llegan a tener una mayor magnitud y afecta la profundidad que los esfuerzos residuales son generados por una herramienta afilada



Figura 1.- Desperdicio de material por martensita reformada

## 1.2.-INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA.

Dada la importancia del sector automotriz en México y en el mundo de elevar los estándares de calidad y competitividad de las industrias, es de relevancia la necesidad de llevar a cabo estudios serios que permitan desarrollar tecnologías adecuadas para producir auto partes de alta calidad que cumplan con las exigencias de servicio.

Desde el punto de vista tecnológico contar con una (PND) que permita la detección oportuna y fiable de defectos en la estructura de las piezas a trabajar (ACERO) es de gran importancia y tiene un impacto industrial en el área económica donde se trabaje con este tipo de métodos y tecnologías.

Este proyecto forma parte de un esfuerzo más amplio para comprender y optimizar un nuevo proceso de mecanizado (torneado en duro) que lo hace más atractivo para la industria. Este proceso es muy parecido al torneado convencional, aunque la máquina y la herramienta de corte deben diseñarse para soportar las mayores fuerzas y temperaturas involucradas. En este proceso de torneado o rectificado en duro aparece el fenómeno metalúrgico denominado “capa blanca de martensita” o “White layer” cerca de la superficie debido a los parámetros de corte agresivos, incluso con una nueva herramienta de corte. Es por eso que este defecto metalúrgico ha causado mucha discusión en la industria donde se implementa este tipo de proceso de rectificado en duro, acerca de que si la capa blanca de martensita reduce la vida a la fatiga de los componentes.

La capa blanca de martensita puede aparecer inesperadamente, y en la actualidad el método para su detección es realizar métodos destructivos, una compañía manufacturera no puede determinar con seguridad si un elemento fabricado tiene este defecto metalúrgico hasta que se realizan los ensayos destructivos.

Actualmente los métodos para detectar capa blanca de martensita no son adecuados para la industria ya que se tienen que realizar secciones transversales de la pieza a evaluar y llevar a un microscopio para revelar su microestructura y realizar un análisis.

Como se mencionó anteriormente el acero es de gran utilidad debido a sus propiedades mecánicas, y es por eso que también es de vital importancia hacer estudios que nos lleven a la prevención de fallas en este material; ya que una falla puede llegar al punto de pérdidas económicas en una empresa dedicada a fabricar componentes con este material hasta las pérdidas humanas en un accidente a raíz de un defecto en el material que no fue detectado.

En la actualidad existe una necesidad tecnológica para la inspección de (PND) en el acero. Con el paso de los años han surgido distintas pruebas no destructivas con alto impacto industrial debido al beneficio económico que brindan. La rentabilidad de solo retirar piezas defectuosas y la posibilidad de evitar fallas catastróficas solo monitoreando el estado de la estructura del acero, son algunas de las ventajas que nos brindan estas (PND).

La industria en general está cada vez más interesada en obtener máxima confiabilidad y disponibilidad de sus equipos. Por esto, es que las pruebas no



destructivas (PND) son las que brindan las soluciones más adecuadas. Entre estas se encuentran las técnicas que miden las propiedades magnéticas de los materiales. Como ejemplo claro están los aceros, estas propiedades son sensibles a los cambios en el material tales como la microestructura y la presencia de esfuerzos residuales.

Las características de perfiles de esfuerzos residuales y sus efectos ya sean por contacto entre pieza y herramienta en el proceso de rectificado trae como resultado esfuerzos residuales a tensión y compresión y también presencia de capa blanca de martensita; o en el proceso de tratamiento térmico en el temple traen mucha controversia en la industria ya que por estos efectos se reduce la vida útil de la pieza. Se ha demostrado en otros estudios que: el torneado en duro con una herramienta fresca o nueva genera una forma de gancho en los perfiles de esfuerzos residuales caracterizados por una superficie de esfuerzos residuales a compresión por debajo de la superficie. Mientras más suave sea el rectificado solo se generarían máximos esfuerzos residuales a compresión en la superficie. Esta forma de gancho de perfiles de esfuerzos residuales a compresión contribuye en un 40% más en la vida útil de la pieza. Un torneado con capa blanca de martensita en la superficie por una herramienta gastada genera un alto contenido de esfuerzos residuales a tensión en el área de la capa blanca. Los altos esfuerzos residuales a tensión en la superficie conduce a un periodo de vida a la fatiga mucho más corto (7.6 veces).

Los métodos de evaluación no destructivos más comunes se basan o utilizan radiación ionizante, líquidos penetrantes, ultrasonidos, entre otros. Dependiendo lo que se vaya analizar es el tipo de (PND) que se llevara a cabo, ya que alguna de las (PND) mencionadas anteriormente pueden ser utilizados en el acero pero presentan el inconveniente de que no son rentables e incluso puede que no sean prácticos para usarse en instalaciones industriales. La limitación de estos métodos para detectar cargas cíclicas o degradación termomecánica ha llegado a ser un factor importante para el desarrollo de nuevos métodos de (PND) en aceros basados en métodos magnéticos.

Como se mencionó anteriormente los cambios microestructurales en los aceros se caracterizan generalmente usando métodos convencionales incluyendo metalografía, medición de la dureza, ensayos mecánicos, etc. Estas

pruebas destructivas son bastante caras, se pierde mucho tiempo y por lo general las muestras examinadas no se pueden utilizar después de los ensayos destructivos para ningún propósito útil. Desde el punto de vista industrial, la aplicación de (PND) es más rentable ya que el tiempo de inspección es más rápido que los métodos convencionales, es menos costosa; ya que para hacer las pruebas destructivas se requiere de un técnico para hacer las secciones transversales, que monte la sección a evaluar, que se le aplique proceso de lijado y pulido y que sea atacada con químicos especiales para revelar así la microestructura y poder hacer la evaluación, llevando en todo este proceso una cantidad económica elevada en los consumibles; y cabe mencionar el tiempo que se le paga al operador

Entre las diversas (PND) que existen, ha habido un resurgimiento del interés para la aplicación de las propiedades magnéticas de los materiales como las Corrientes de Eddy y para este caso el Ruido Barkhausen. Estas (PND) únicas son capaces de hacer una distinción entre la información proporcionada por cada uno de los cambios micro estructurales en las partes del acero.

La (PND) Ruido Barkhausen es una de las técnicas micro magnéticas que han sido consideradas como una técnica potencial dentro de esta rama para la caracterización microestructural.

Cuando los materiales ferromagnéticos se someten a campos magnéticos variables, el aumento en la inducción se presenta de manera discontinua, como respuesta al movimiento de las paredes de dominio magnético. Estos aumentos bruscos de inducción se conocen como Ruido Magnético de Barkhausen. La señal se detecta como un pulso de voltaje eléctrico cuando una bobina se coloca sobre la superficie de la muestra mientras está ocurriendo el movimiento de las paredes de dominio. El Ruido Barkhausen es sensible a las características del material como la microestructura y los esfuerzos mecánicos aplicados. Esto hace que se potencialice como una (PND).

### **1.3.-HIPOTESIS DE INVESTIGACIÓN**

-El estudio Barkhausen está determinado para aplicarse como una (PND) en flechas de transmisión con la finalidad de evaluar la calidad de la pieza sin tener que destruirla con la certeza que sea 100 % fiable.

-Busca analizar los esfuerzos residuales que se quedan en la pieza.

#### 1.4.-OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

Los métodos actuales para la detección de capa blanca no son adecuados para la industria. El método con que se cuenta actualmente más fiable para la detección de capa blanca implica el examen de una sección transversal de la pieza de trabajo y llevada al microscopio. Esta técnica requiere de mucho tiempo, mano de obra, dinero y lo más importante es que destruye la pieza de trabajo.

Por lo mencionado anterior se realiza el presente proyecto que tienen por objetivos:

- La implementación de una prueba no destructiva (PND) mediante el RUIDO BARKHAUSEN para evaluación de martensita reformada en flechas de transmisión y correlacionar los efectos de la microestructura con la dureza del material ya que en la actualidad para la detección de capa blanca de martensita es necesario realizar prueba destructiva y esto es inaceptable para piezas de producción.

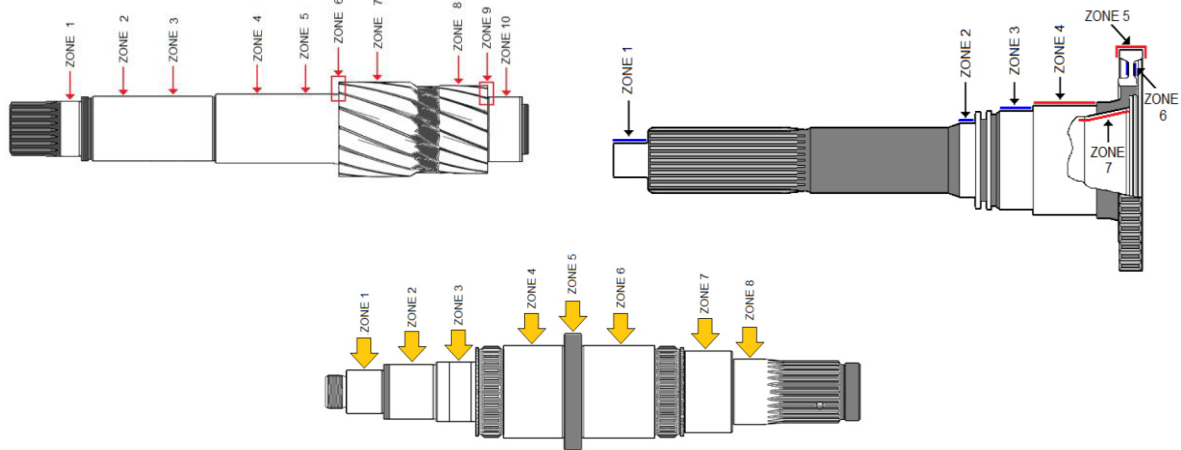


Figura 2.- Flechas de transmisión

# CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO

## 2.1.- Pruebas No Destructivas

Definición de Pruebas no Destructivas.- Es el conjunto de aplicaciones de métodos físicos indirectos que tienen como finalidad verificar la sanidad del material sin alterar de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, dimensionales, etc.

Son técnicas de inspección que se utilizan para la detección y evaluación de las posibles discontinuidades que puedan existir tanto en la superficie como en el interior de los materiales metálicos ( placa rolada, material forjado, piezas de fundición, soldadura, etc.) que se emplean para la fabricación de recipientes sujetos a presión, tanques atmosféricos, válvulas, árboles, cabezales, tubería, etc.; a estas técnicas se les llama Pruebas No Destructivas porque al aplicarlas, los materiales no se destruyen ni se ven afectadas sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y/o características dimensionales.

-Etapas o situaciones en las que son aplicables las Pruebas No Destructivas.  
Recepción de materia prima.- Las PND son aplicables por muestreo o al 100% para verificar que los materiales que se reciban en el almacén efectivamente cumplen con los requisitos de calidad indicados en los certificados y/o órdenes de compra.

Procesos de fabricación.- Las PND se aplican en algunas etapas críticas de fabricación estratégicamente seleccionadas, con la finalidad de detectar oportunamente la posible presencia de discontinuidades y así poder tomar acciones correctivas para subsanar las causas que las originan.

Maquinado o Ensamble Final.-Las PND son aplicadas para verificar si las superficies con acabado final no tienen imperfecciones que hayan aflorado a la superficie después del maquinado para dar las medidas finales y que afectan su utilidad interna o futura.

Procesos de soldadura.-Las PND son aplicadas inmediatamente después de concluida y enfriada una unión con soldadura (algunos aceros requieren de 48 a 72 Hrs., después de concluida la soldadura), con la finalidad de evaluar la

sanidad superficial e interna tanto de la soldadura así como de la zona afectada por el calor.

Procesos de reparación con soldadura.-Las PND se aplican para ir monitoreando la remoción de los defectos inicialmente encontrados, para eliminarlos o reducir a un tamaño aceptable; después de la remoción de los defectos, las zonas exploradas se rellenan con soldadura y esta soldadura es necesario se evalúe su sanidad superficial e interna utilizando las PND.

Mantenimiento preventivo.- Las PND son una de las herramientas utilizadas para evaluar la integridad mecánica de los materiales en servicio que son susceptibles de sufrir: corrosión, picaduras, erosión y grietas por fatiga, grietas por corrosión bajo esfuerzo, daños por hidrógeno, etc.

Existen diferentes técnicas no destructivas que se aplican directamente en diferentes elementos y procesos de elaboración, como a continuación se describen:

**-Inspección visual.-** Es la técnica más sencilla. La inspección mediante inspección visual cuenta con un amplio abanico de posibilidades y capacidades, confiriéndole una versatilidad única en los controles de calidad de los productos, tanto en fabricación, como en servicio. Dentro del extenso rango de aplicación de inspección visual de la industria, cabe destacar los siguientes ámbitos:

- Inspección visual de soldadura en fabricación (control de calidad del acabado, forma y tamaño).
- Inspección mecánica de todo tipo de soportes de tubería en el montaje y en la operación.
- Inspección en servicio de equipos y componentes, desde intercambiadores de calor hasta tornillería.
- Detección de fugas en sistemas de tuberías y juntas embridadas.
- Detección de corrosión, erosión y/o degradaciones propias del servicio en bombas, válvulas, tuberías, estructuras, etc.
- Control del acabado de componentes durante la fabricación: condición superficial, ausencia de defectos, ensamblaje, embalaje, etc.
- Detección de objetos extraños en el interior de equipos y componentes que puedan afectar a su función.



Figura 3.- Prueba No Destructiva por Inspección visual.

**-Líquidos Penetrantes.-** "Un procedimiento de inspección no destructiva diseñado para detectar y exponer discontinuidades superficiales en materiales de ingeniería" Es la primera prueba no destructiva considerada para inspección de productos en la industria, gracias a que:

- Su costo es bastante económico.
- Puede aplicarse en una gran variedad de materiales, objetos, formas, tamaños, ubicaciones y condiciones del medio ambiente. Sin embargo los resultados dependen del personal que realiza la inspección.

La longitud de las discontinuidades puede ser muy exactamente determinada, pero su profundidad no. La inspección es críticamente dependiente de la limpieza de las superficies inspeccionadas y del cuidado del técnico para asegurar una técnica adecuada y la observación de las indicaciones.

Se aplica básicamente en:

- Inspección de materia prima
- Inspección de proceso
- Inspección de producto terminado
- Mantenimiento de equipo y maquinaria

Se utiliza para la inspección de materiales metálicos magnéticos (acero, etc.) y no magnéticos (aceros inoxidables, aluminios, etc.) o materiales no magnéticos (plástico, cerámicos, etc.)

Sus ventajas son:

- Aplicable en piezas de forma compleja.
- Inspección en una variedad de materiales.
- Inspección en bajo costo.
- Inspección sencilla.
- No requiere suministro de energía eléctrica.
- Equipo de prueba tan sencillo como un pequeño conjunto de botes a presión.
- La inspección puede ser automatizada.
- La inspección puede llevarse a cabo en el sitio en el que se localiza el material de interés.

#### Procedimiento Básico

1.- Preparación, limpieza y secado de la superficie.



#### Procedimiento Básico

2.- Aplicación del penetrante y tiempo de penetración.  
3.- Remoción del exceso de penetrante.



Dejar transcurrir 5 minutos



#### Procedimiento Básico

4.- Aplicación del Revelador y tiempo de Revelado.



Dejar transcurrir 5 minutos



#### Procedimiento Básico

5.- Inspección para detectar indicaciones.



#### Procedimiento Básico

6.- Limpieza Posterior.



Figura 4.- Prueba No Destructiva por líquidos penetrantes. (Procedimiento)

**-Partículas Magnéticas.-** La inspección por partículas magnéticas es un ensayo no destructivo que se emplea para detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales, en muestras que pueden ser magnetizadas. Consta de tres operaciones básicas:

- a) Establecer un flujo magnético adecuado,
- b) Aplicación de las partículas magnéticas,
- c) Interpretación y evaluación de los resultados.

El método de inspección por partículas magnéticas es utilizado en diferentes ramas de la industria, como: metalmecánica, aeronáutica, naval, construcción, etc. Se aplica en:

- Inspección de materia prima;
- Inspección en proceso;
- Inspección de producto terminado;
- Mantenimiento de equipo y maquinaria. Se utiliza para inspección de materiales soldados, fundidos, forjados, rolados, etc.

Las principales ventajas del método de inspección por partículas magnéticas son:

- Inspección relativamente rápida y de bajo costo,
- Equipo relativamente simple, provisto de controles utilizados para ajustar la corriente y un amperímetro visible para verificar la fuerza de magnetización que ha sido creada para la inspección,
- Equipo portátil y adaptable a muestras pequeñas o grandes,
- Se requiere menor limpieza que en líquidos penetrantes,
- Se pueden detectar discontinuidades subsuperficiales,
- Las indicaciones se forman directamente en la superficie de la muestra,
- No se requiere de lecturas electrónicas de calibración o mantenimiento excesivo,
- Se obtienen mejores resultados en la detección de discontinuidades llenas de algún contaminante (como carbón, escoria, etc.) y que no pueden ser detectadas en una inspección por líquidos penetrantes.

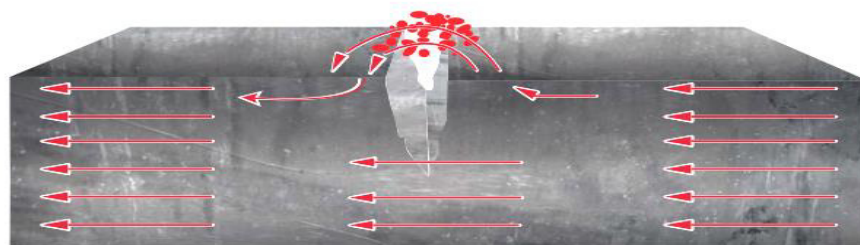


Figura 5.- Prueba No Destructiva por Partículas Magnéticas. Agrupamiento de partículas a causa de grieta.



**-Corrientes de Eddy.-** Esta basada en los principios de la inducción electromagnética y es utilizada para identificar o diferenciar entre una amplia variedad de condiciones físicas, estructurales y metalúrgicas en partes metálicas ferromagnéticas y no ferromagnéticas, y en partes no metálicas que sean eléctricamente conductoras.

Las corrientes de Eddy son creadas usando la inducción electromagnética, este método no requiere contacto eléctrico directo con la parte que está siendo inspeccionada.

**-Aplicaciones de las corrientes Eddy en Pruebas No Destructivas.**

Sus principales aplicaciones se encuentran en la medición o determinación de propiedades tales como la conductividad eléctrica, la permeabilidad magnética, el tamaño de grano, dureza, dimensiones físicas, etc., también sirve para detectar, traslapes, grietas, porosidades e inclusiones.

- Medir o identificar condiciones o propiedades tales como: conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, tamaño de grano, condición de tratamiento térmico, dureza y dimensiones físicas de los materiales.
- Detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales, como costuras, traslapes, grietas, porosidades e inclusiones.
- Detectar irregularidades en la estructura del material.
- Medir el espesor de un recubrimiento no conductor sobre un metal conductor, o el espesor de un recubrimiento metálico no magnético sobre un metal magnético.

**Ventajas:**

- Se aplica a todos los metales, electroconductores y aleaciones.
- Alta velocidad de prueba.
- Medición exacta de la conductividad.
- Indicación inmediata.
- Detección de áreas de discontinuidades muy pequeñas. (  $0.0387 \text{ mm}^2 - 0.00006 \text{ in}^2$  )
- La mayoría de los equipos trabajan con baterías y son portátiles.
- La única unión entre el equipo y el artículo bajo inspección es un campo magnético, no existe posibilidad de dañar la pieza.

**Limitaciones:**

- La capacidad de penetración está restringida a menos de 6 mm.

- En algunos casos es difícil verificar los metales ferromagnéticos.
- Se aplica a todas las superficies formas uniformes y regulares.
- Los procedimientos son aplicables únicamente a materiales conductores.
- No se puede identificar claramente la naturaleza específica de las discontinuidades.
- Se requiere de personal calificado para realizar la prueba.

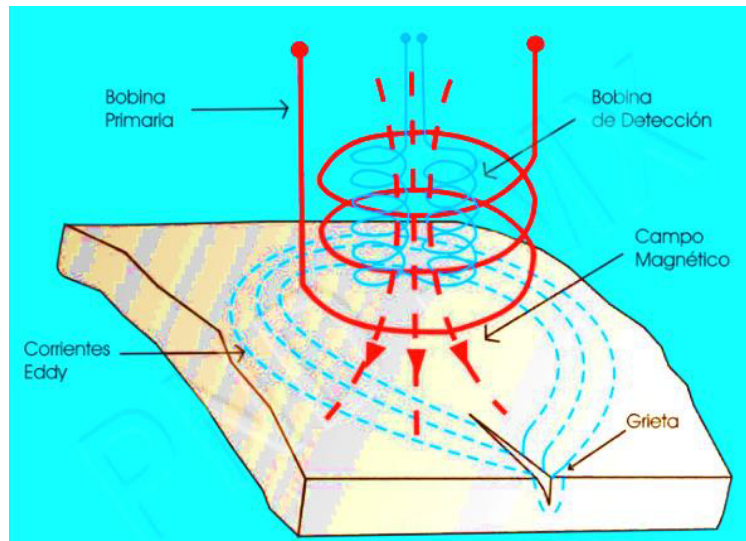


Figura 6.-Principio de Prueba No Destructiva por Corrientes de Eddy.

**-Difracción de Rayos X.-** La difracción de rayos X es uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos X, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina. La difracción de rayos X se basa en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio. El fenómeno de la difracción puede describirse con la Ley de Bragg, que predice la dirección en la que se da interferencia constructiva entre haces de rayos X dispersados coherentemente por un cristal:

$$\lambda = 2 d \sin \theta$$



Figura 7.- Prueba No Destructiva por Difracción de Rayos X.

**-Ultrasonido.-** El método de Ultrasonido se basa en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales. En la figura de abajo, se muestra un sensor o transductor acústicamente acoplado en la superficie de un material. Este sensor, contiene un elemento piezo-eléctrico, cuya función es convertir pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las cuales a su vez generan sonido, con una frecuencia en el rango de los mega Hertz (inaudible al oído humano). El sonido o las vibraciones, en forma de ondas elásticas, se propaga a través del material hasta que pierde por completo su intensidad o hasta que topa con una interface, es decir algún otro material tal como el aire o el agua y, como consecuencia, las ondas pueden sufrir reflexión, refracción, distorsión, etc. Lo cual puede traducirse en un cambio de intensidad, dirección y ángulo de propagación de las ondas originales.



Figura 8.- Prueba No Destructiva por Ultrasonido.

## 2.2.-Efecto Barkhausen

Heinrich Barkhausen observo por primera vez en 1919 el fenómeno de cambios discontinuos en la magnetización de un material ferromagnético al aplicarle una intensidad de campo magnético  $H$  variante en el tiempo. Los cambios discontinuos en la magnetización producen una señal que parece ruido al cual se le denomina Ruido Barkhausen en su honor.

Es un fenómeno micro magnético observado en materiales ferromagnéticos, en este fenómeno existe los llamados paredes Bloch y dominios. En presencia de un campo magnético externo, la muestra de magnetización cambia. Los dominios magnéticos paralelos al campo aplicado, crece al campo inducido en dirección al campo aplicado.

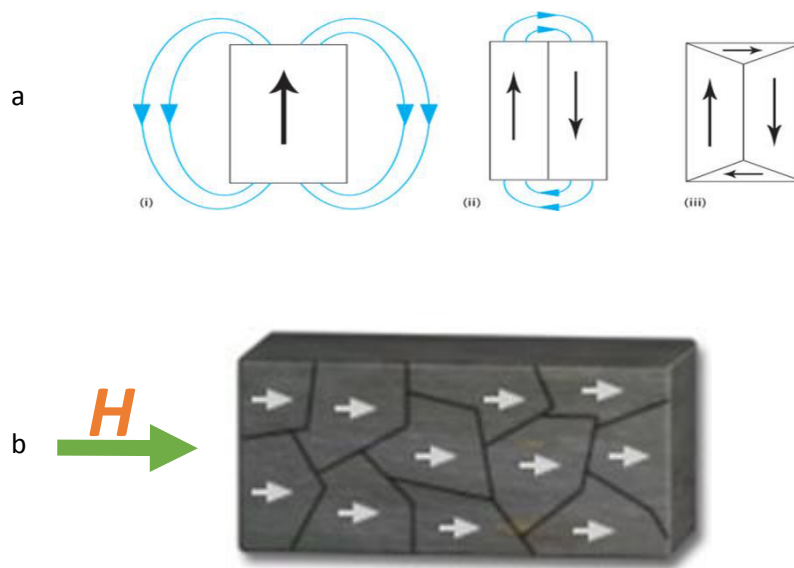


Figura 9.- a) Dominios magnéticos. b) Dominios magnéticos orientados por un campo magnético externo

El tamaño y la dirección de los dominios están al azar de modo que no hay un campo magnético establecido.

El Ruido Barkhausen surge cuando un material ferromagnético como el acero es sometido a un campo magnético variable. El ruido es producido por el movimiento discreto de las paredes de los dominios magnéticos. Estos movimientos discretos o saltos generan pulsos magnéticos que pueden ser

monitoreados y detectados por medio de una bobina lectora colocada en la superficie del material.

El ruido Barkhausen se basa en un concepto de medición inductiva de una señal similar al ruido. La cantidad de ruido (en este caso campos magnéticos) para un determinado material está vinculado con la cantidad de impurezas y puede ser buena indicación de propiedades mecánicas del material. Es por eso que el método Barkhausen se puede utilizar como prueba no destructiva (PND) de la degradación de propiedades mecánicas de tal material. El efecto Barkhausen es de gran utilidad ya que tiene un espectro de potencia a partir de la frecuencia de magnetización extendiéndose más allá de 2 MHz en la mayoría de los materiales. Esta frecuencia mencionada penetra el material, y el grado de amortiguación del mismo material determinará la profundidad a la cual se puede obtener información. (La profundidad de medición varía entre 0.05 y 1.5 mm)

En los materiales ferromagnéticos, las regiones en las cuales los momentos magnéticos están alineados en la dirección de magnetización espontánea, se conocen como dominios magnéticos. La dirección de alineación de los dominios magnéticos varía de dominio a dominio. La separación entre los dominios magnéticos son capas de transición que se conocen como paredes de dominio o paredes de Bloch. En materiales ferrosos éstas son de  $180^\circ$  o de  $90^\circ$ . Al aplicar un campo magnético variable a un material ferromagnético, se ha observado que alrededor del campo coercitivo ( $H_c$ ), el aumento en la inducción ( $B$ ) como consecuencia del aumento del campo magnético aplicado ( $H$ ), sucede de manera brusca, como pequeños saltos que se conocen como saltos de Barkhausen.

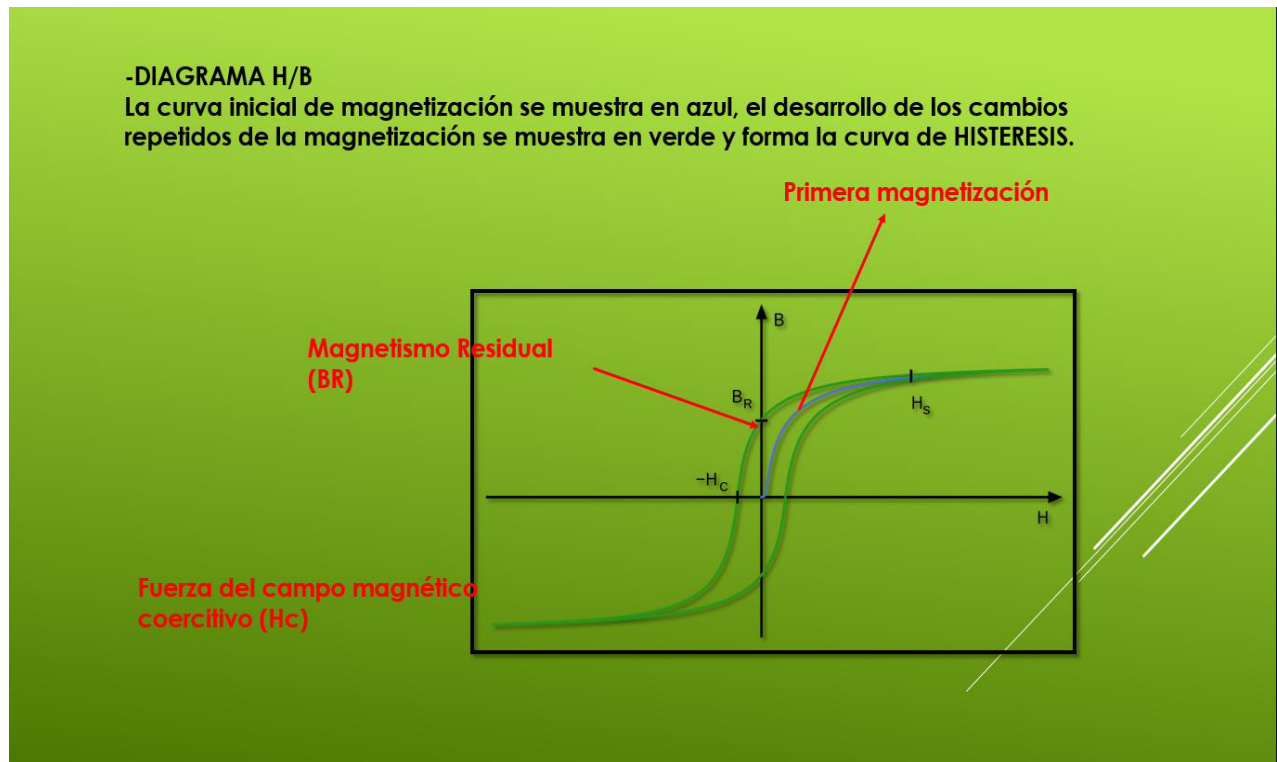


Figura 10.- Lazo de Histéresis de un material ferromagnético.

En el ciclo de histéresis de un material ferromagnético, el proceso de magnetización toma lugar mediante una secuencia aleatoria de movimientos discontinuos de las paredes de dominios magnéticos.

Con ayuda de un sensor Barkhausen que sirve para detectar capa blanca en los componentes se pretende observar hasta qué punto este sensor puede detectar defectos microestructurales con el fin de ahorrar tiempo y sobre todo dinero. Este sensor funciona mediante aplicación de un campo magnético a un material ferromagnético y; observando el campo magnético inducido, la amplitud de la señal producida por el campo eléctrico se verá afectada por la dureza del material y de la superficie del mismo.

El sensor Barkhausen puede tomar medidas rápidamente sin tener que realizar secciones transversales de las piezas de trabajo a evaluar ya que es conocido por ser sensible a varios factores que son correlacionados con la capa blanca de martensita ahorrando tiempo y mano de obra en realizar pruebas destructivas.

Es por eso que se busca estudiar y analizar a fondo este método ya que para la empresa SISAMEX es una nueva tecnología y no se ha explorado y se necesitan realizar pruebas que demuestren su capacidad y fiabilidad.

### **2.3.-FLECHAS DE TRANSMISIÓN**

Las flechas de transmisión son una de las partes más importantes y funcionales de los vehículos ya que toman la potencia del motor y la transfieren a toda la unidad.

Están conectadas a la transmisión por una flecha intermedia hacia la junta, y dependiendo la sincronización de a transmisión será la velocidad a la cual gire la flecha y la potencia con la que se mueva el vehículo.

En la parte posterior del vehículo la flecha está conectada al eje trasero mediante otro miembro llamado diferencial, transmitiendo la potencia o el movimiento hacia las ruedas traseras.

El uso de flechas depende de la función para la que se requiera, el tipo de trabajo para el cual se usara y la cantidad de fuerza o potencia necesaria.

Están sometidas a torsión, esfuerzos de tensión y compresión, cargas y son portadoras de torque, es por ello que necesitan ser resistentes y ligeras a la vez.

Debido a que las flechas son importantes para la transmisión de la potencia hacia el vehículo, es necesario hacer estudios para saber que se encuentran en buen estado y que al estar en operación éstas no presenten algún tipo de falla.



Figura 11.-Flecha principal

## Etapas de producción en las flechas de transmisión.

1. **Proceso de maquinado.-** El proceso de maquinado de las flechas de transmisión se realiza mediante un torneado en duro y una de las ventajas de este proceso es: de que es capaz de alcanzar tolerancias y requisitos de calidad necesarias para el buen desempeño de la pieza.
2. **Tratamiento Térmico.-** para darle las propiedades mecánicas requeridas a la flecha (dureza superficial la cual le dará una alta resistencia al desgaste).
3. **Proceso de Rectificado.-** se enderezan, rectifican y se les da un acabado final. . En esta etapa existe reticencia en la industria debido a que en el momento de que se utilizan herramientas de corte agresivas en la pieza de trabajo se crea un defecto denominado “CAPA BLANCA” (White layer) el cual reduce la vida útil de la flecha.
4. **Ensamble.-** se montan los engranes con sus cuñeros.

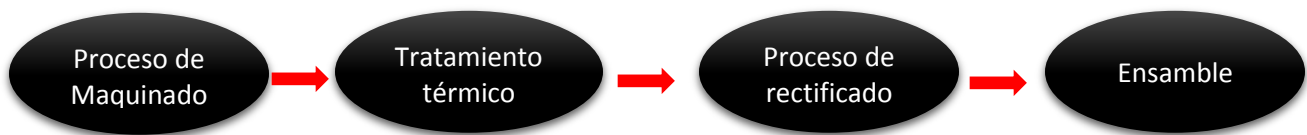


Figura 12.- Proceso de producción de flechas de transmisión.

## 2.4.-TRANSFORMACIÓN MARTENSITICA

Si se enfría rápidamente la austenita a una velocidad mayor que la velocidad crítica de temple (menor velocidad a la que se impide la formación de las estructuras perlito-bainíticas, que corresponde, por ejemplo a la curva de enfriamiento, la transformación de la austenita tiene lugar por debajo de los 250°C. La estructura que se forma como consecuencia de la citada transformación se denomina Martensita (es la microestructura más dura y



frágil de los aceros) y el enfriamiento rápido que hemos mencionado recibe el nombre de temple.

La martensita es una solución sólida sobresaturada en carbono que presenta una estructura tetragonal centrada en el cuerpo con los átomos de carbono ocupando posiciones octaédricas intersticiales a lo largo del eje mayor de la celda. Cuanto mayor es el contenido de carbono de la martensita, un mayor número de lugares intersticiales son ocupados y consecuentemente, la tetragonalidad de la celda aumenta.

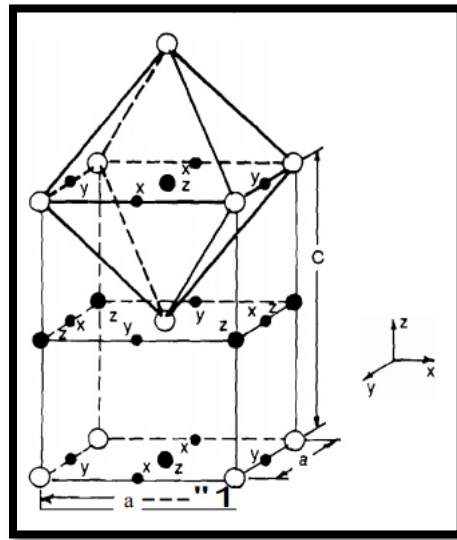


Figura 13.- Estructura Martensítica.

La transformación martensítica no es una transformación que tiene lugar por nucleación y crecimiento, sino que presenta unas características propias:

- En virtud de la práctica ausencia de difusión en estado sólido motivada por las bajas temperaturas a la que tiene lugar, la transformación martensítica no altera la composición química de las fases que intervienen: la composición química de la martensita es la misma que la de la austenita de la que procede. De este modo el cambio estructural producido por la transformación ocurre por cizalladura en virtud de pequeños movimientos atómicos (los átomos se desplazan distancias inferiores al parámetro de la red).

- La transformación martensítica no depende del tiempo sino de la temperatura. Enfriada la austenita por debajo de la temperatura a la que esta

transformación comienza a producirse martensita, esta tiene lugar instantáneamente y no progresa aunque tengamos constante la temperatura durante largos periodos de tiempo.

-La transformación de la austenita en martensita tiene lugar con un aumento de volumen que depende ligeramente del contenido de carbono del acero, pero que en términos generales se sitúa en torno al 4%. Una consecuencia de esta característica es la creación de un fuerte campo local de tensiones residuales, que puede en algunos casos llegar a producir el agrietamiento del acero.

-La cantidad de austenita transformada en martensita aumenta al disminuir la temperatura.

**M.-** temperatura a la que se inicia la transformación martensítica.

**Mf.-** temperatura a la que toda la austenita se ha transformado en martensita.

Estas temperaturas dependen casi exclusivamente de la composición química del acero: cualquier elemento químico, a excepción del cobalto y aluminio, disminuyen la temperatura de la martensita, pero la influencia de los elementos intersticiales (carbono y nitrógeno) es mucho mayor.

El contenido de austenita residual tras el temple de un acero depende de tres factores: composición química del acero, proceso de austenización previo y velocidad de temple.

Para cada tipo de acero existe una velocidad de enfriamiento mínima que asegura la transformación martensítica al 100%.

Para aceros al carbono está comprendida entre los 200 y 600°C/s.

En caso de los aceros aliados la temperatura suele ser de 50°C/s.

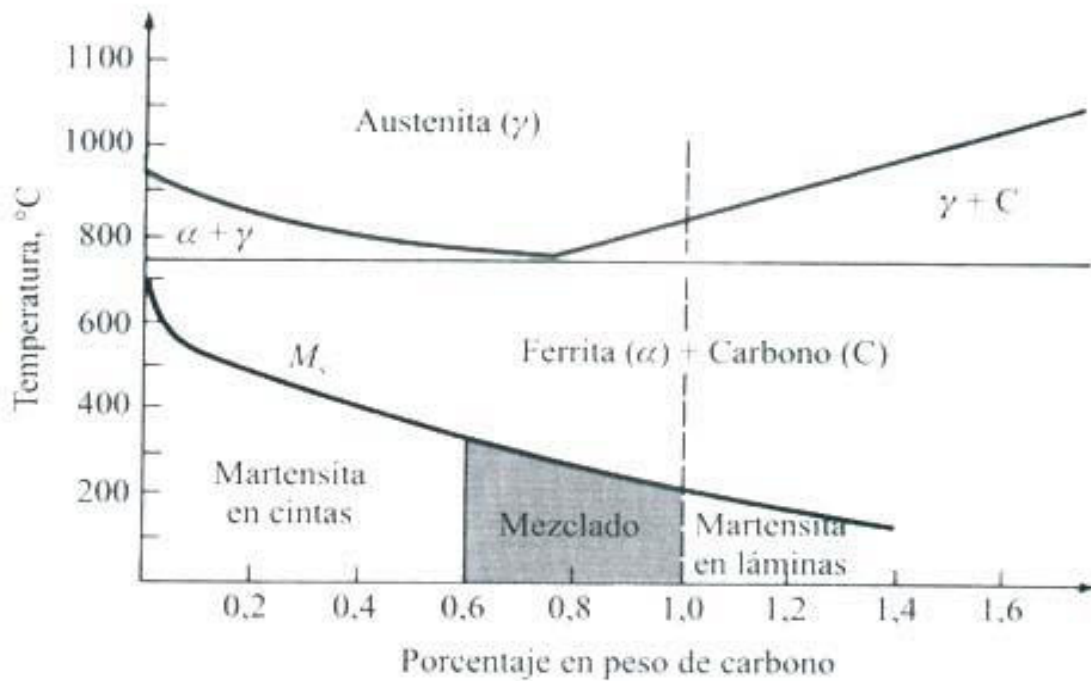


Figura 14.-Efecto del contenido de carbono sobre la temperatura de inicio de transformación de martensita

### ¿Cómo se genera la capa blanca de martensita?

Antes que todo, cabe mencionar que la capa blanca de martensita se genera en el proceso de torneado y rectificado en duro, donde una herramienta de corte va eliminando el material en la pieza de trabajo. En la actualidad hay reticencia en la industria en adoptar este tipo de proceso de torneado y rectificado en duro ya que aparece este defecto metalúrgico llamado “capa blanca de martensita” y ésta reduce la vida útil de la pieza.

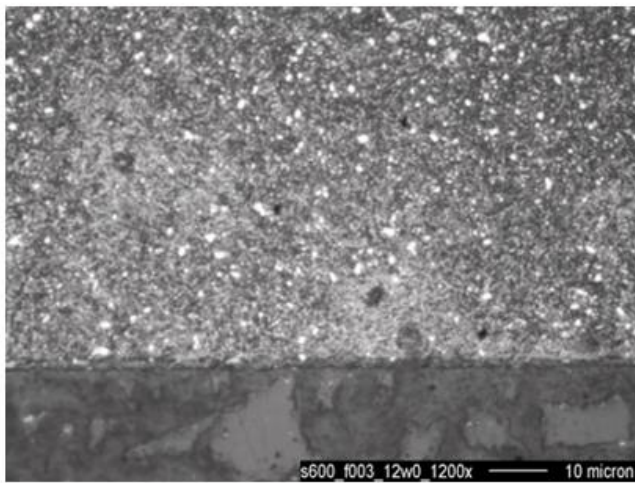
Por lo regular la “capa blanca” aparece en la superficie a partir de 1-5  $\mu\text{m}$  de profundidad que resiste al ataque químico, y es por eso que aparece en color blanco en una micrografía. Este fenómeno metalúrgico se manifiesta cuando se usan parámetros de corte agresivos, incluso usando una nueva herramienta. Si se seleccionan parámetros de corte conservadores, uno no espera capa blanca, es por eso que se deben realizar otros estudios para optimizar el proceso. Existe cierto debate si la capa blanca realmente disminuye la vida útil o fatiga de la pieza, sin embargo nos es bien comprendido y se evita.

Es claro mencionar que también influye el tratamiento térmico que se le aplica a la pieza de trabajo antes de ser rectificada. La pieza de trabajo es llevada al área de carburizado aproximadamente a 900°C a una presión atmosférica determinada de Carbono, haciendo que las partículas de Carbono penetren al material; ya que termina este proceso, la pieza es sometida a un proceso de temple para darle propiedades mecánicas a ésta tales son: como aumento de dureza y resistencia.

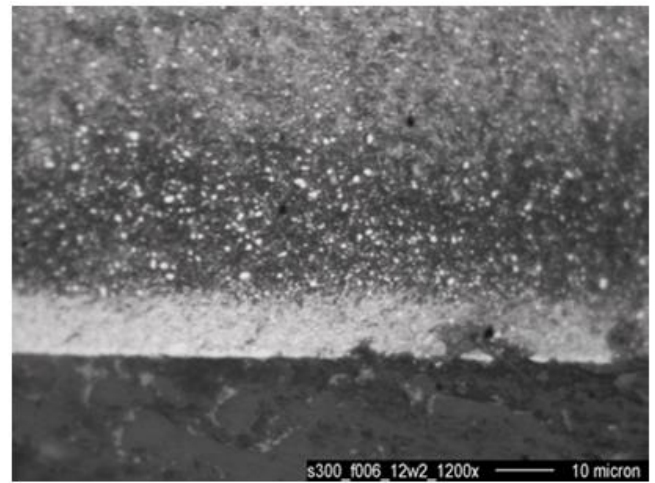
Después de este proceso la pieza de trabajo está lista para el proceso de rectificado. En el momento en el que la pieza de trabajo es rectificada, el herramental que va dándole acabado a la pieza va generando una fricción por el contacto abrasivo que existe entre la pieza de trabajo y el herramental, y ésta fricción genera aumento de calor y lo consiguiente es aumento de temperatura, entonces el aumento de temperatura genera transformaciones de fase por la estructura del material formándose así la tan mencionada capa blanca de martensita.

Es una condición micro-estructural, donde la estructura del grano de un metal es extremadamente refinada. Esta condición puede ocurrir en la superficie maquinada de piezas torneadas duros, sobre todo cuando se aplican los parámetros de mecanizado agresivos o un corte desgastado. En la industria, cuando existe capa blanca, es típicamente menos de 2 mm de espesor y se retira por otro proceso de acabado, tales como súper acabado. Sería ventajoso si el sensor de Barkhausen se pudiera utilizar para detectar el excesivo resultado de capa blanca de martensita de modo de evitar otros pasos mencionados anteriormente para su detención.

El método típico para la observación de capa blanca en el laboratorio implica grabado químico una sección transversal de una muestra con el fin de acentuar visualmente la microestructura. Cuando una muestra es grabada y se observa con un microscopio óptico, la capa de martensita aparece de color blanco. La capa blanca de martensita suele ir acompañado de una "capa oscura" por debajo de ella, a pesar de que la capa oscura puede aparecer sin capa blanca.



a



b

Figura 15.- a) Muestra sin capa blanca b) Muestra con capa blanca

La capa blanca de martensita se produce en la superficie del acero y puede ser hasta de 10 micras de espesor. La capa oscura debajo de ella puede ser dos o tres veces más gruesa. La transición entre la capa blanca y oscura suele ser brusca, y se produce dentro de una zona de transición de menos de 1 mm de profundidad.

## 2.5.-LOS SENSORES EN LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

Asociados con las industrias, la constante necesidad de reducir los costos de fabricación y mejorar la precisión, son las ideas de la producción de la primera parte correcta y la producción de cero defectos. Estos conceptos

también están estrechamente vinculados con la evolución hacia la fabricación “justo a tiempo”, lo que requiere de procesos flexibles de alta calidad. Si se puede lograr, entonces el tiempo de configuración general se puede reducir en gran medida. Del mismo modo, si todas las partes se puedan manufacturar alta calidad, entonces hay menos desechos, menos tiempo de inspección, y el tiempo de mecanizado menor desperdicio.

Durante las últimas décadas, dos enfoques diferentes han atacado estos problemas para reducir costes para la industria. La primera es la de obtener una mejor comprensión determinista del proceso de mecanizado. Esto conduce a la mejora de los modelos que pueden predecir mejor cómo la herramienta y la pieza de trabajo interactúan durante el mecanizado. En general, este enfoque puede ser difícil debido a la complejidad del proceso de mecanizado.

Otro enfoque es la integración de sensores en proceso con la máquina herramienta que puede evaluar la condición de la pieza para optimizar los parámetros de mecanizado. Uno o más sensores detectan propiedades esenciales de la pieza de trabajo y esta información se introduce en un bucle de control que ajusta los parámetros de la máquina tales como la velocidad, alimentación, tiempo de ciclo, etc. Cuando se diseña adecuadamente, estos sistemas de control de maximizar el rendimiento de modo que partes deseables se fabrican a una alta tasa de producción.

Los sensores se utilizan ampliamente en los sistemas modernos para medir o detectar parámetros físicos, como la posición, movimiento, fuerza, aceleración, temperatura, presión, etc. Mientras que una variedad de diferentes tipos de sensores existe para la medición de estos y otros parámetros, todos ellos sufren de diversas limitaciones.

## **2.6.-APLICACIONES DEL SENSOR BARKHAUSEN**

Este fenómeno es investigado estadísticamente mediante la medición de voltaje observado y recogido mediante el sensor durante la magnetización del material. Este análisis de ruido Barkhausen puede dar información en la interacción entre las paredes de dominio magnético y las configuraciones de esfuerzos o la composición microestructural. Además de justificar que es una técnica no destructiva.

Como se ha mencionado repetitivas veces en párrafos anteriores, actualmente en Sisamex se tienen métodos destructivos para la evaluación de éste defecto metalúrgico que ha sido causa de mucho desperdicio y dinero en la compañía. La amplitud de la señal producida por el campo magnético inducido es afectada por la dureza del material y esfuerzos residuales. Más adelante se pretende analizar estas señales inducidas y ver que correlación tienen para ver si es posible ver el espesor de la capa blanca de martensita y las magnitudes de los esfuerzos residuales quedados en la pieza.

Pero éste sensor tiene muchos más alcances que solo el de detectar capa blanca de martensita en procesos de rectificado en duro, sino también tiene el alcance de detectar defectos de rugosidad superficial para esfuerzos residuales y mecanizado, detección de defectos de pulido y rectificado, una evaluación en el proceso del defecto shot-peening y también se pretende que se pueda aplicar en tratamientos térmicos tales como temple por inducción ya que pretende evaluar alguna modificación tanto del estrés y de la microestructura.

El sensor de Barkhausen tiene varias ventajas que lo hacen atractivo como un medidor en proceso. Lo más importante, es capaz de tomar mediciones rápidas y no destructivas de materiales ferromagnéticos. Fuera de línea, el sensor se utiliza generalmente con sólo tocar la sonda a la pieza de trabajo. También se puede utilizar para medir la pieza de trabajo de rotación, también siempre que el sensor se mantiene a una distancia constante de la superficie.

Varios grupos han tenido éxito usando el sensor de Barkhausen para medir una variedad de propiedades de los materiales, tanto durante el proceso y fuera de línea.



Figura 16.- Equipo de medición Barkhausen

## 2.7.-IMPORTANCIA

Existe cierto debate si la capa blanca de martensita en realidad disminuye la fuerza o la fatiga de vida de una parte o componente, pero no obstante no se entiende bien y por lo tanto se trata de evitar. Sin embargo, debido a los muchos factores que afectan a la formación de capa blanca, que actualmente es difícil predecir exactamente cuándo se forma o la gravedad de afectación.

El estudio de este proyecto es evaluar la calidad de la pieza (flecha de transmisión) ya que la capa blanca de martensita detectada en las flechas de transmisión reduce la vida útil de la misma, es por eso que con colaboración de la empresa SISAMEX se pretende analizar éste fenómeno mediante el Ruido Barkhausen para ver qué tan fiable es e implementarse en planta, ya que al momento de que una flecha es detectada con capa blanca de martensita se tienen que realizar pruebas destructivas (atacar pieza-realizar metalografías-etc.), generando pérdida de producción llevando consigo pérdidas monetarias.

La caracterización microestructural por medio de pruebas no destructivas como las de este trabajo se consideran de gran importancia para la evaluación de la calidad de la microestructura inicial de alguna pieza a tratar. Como se mencionó anteriormente las técnicas convencionales como las metalografías, inspección de superficies consumen más tiempo y dinero, y mediante la (PND) Barkhausen ha demostrado tener un gran potencial para la caracterización de la microestructura en aceros ferríticos de alto contenido de carbono.



Aunque el aumento de carbono es el principal elemento de aleación en aceros proporciona una alta resistencia y dureza con costos razonables, sino tambien reduce la ductilidad que es necesario para los fines de fabricación.

Esta técnica es de gran utilidad para los materiales ferromagnéticos ya que durante el proceso de magnetización puede ser utilizado para ver defectos en las propiedades cristalinas. Por ejemplo esta (PND) ya se ha usado para evaluar la calidad del tratamiento térmico, para medir la profundidad de tratamiento de superficie. Esto explica porque los últimos 20 años las características microestructurales han sido estudiadas mediante esta prueba Barkhausen ya que tienen mucha influencia en el tamaño de grano, precipitados de carburo, ferrita, perlita y martensita.

## **2.8.-PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DE LOS MATERIALES.**

Las propiedades electromagnéticas de los materiales se refieren a un número de características electromagnéticas incluyendo permeabilidad magnética, resistividad eléctrica (conductividad eléctrica), densidad de flujo de saturación, fuerza coercitiva, pérdidas de histéresis, permeabilidad inicial, permitividad entre otros.

Gracias a la técnica Barkhausen y a la mayor gama de magnetización del material se puede revelar la diferencia en la interacción de las paredes de dominio con diferentes características microestructurales como la martensita. Esta técnica puede revelar distintos cambios en forma que pueden ser utilizados con éxito para la caracterización de diferentes fases microestructurales en aceros ferríticos.

Con este proyecto se espera que la medición de ruido Barkhausen brinde mayor información en el proceso de magnetización y la influencia de diferentes fases microestructurales.

## **EFFECTOS DE ESFUERZOS RESIDUALES EN BN**

-El efecto magneto elástico es el resultado de las tensiones mecánicas que influyen en las propiedades magnéticas.

-La amplitud de ruido Barkhausen aumenta con esfuerzos de tensión (PARA ACEROS).

-El ruido Barkhausen es proporcional al  $\sigma$  y a la dirección de magnetización.

-Un material ferromagnético sometido a esfuerzo causará cambios en su magnetización, incluso si no hay un campo externo aplicado. Esto es porque los dominios magnéticos están influenciados por el estrés y la tensión resultante dentro del material. Como la tensión elástica interna aumenta, el campo necesario para mover una pared dominio a través de un sitio de fijación, así como el gradiente de energía de pared también aumenta

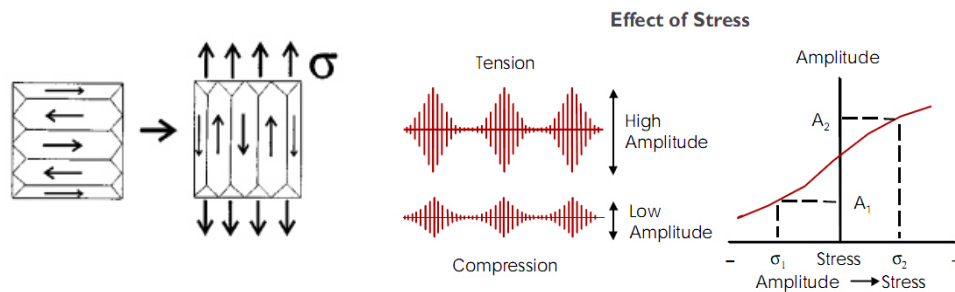


Figura 17.- Efectos de Esfuerzos residuales en el ruido Barkhausen



Figura 18.- Difractometro de Rayos X para medir esfuerzos residuales

## EFFECTOS DE MICROESTRUCTURA EN BN

- El ruido Barkhausen esta inversamente relacionado con la dureza.
- Los cambios de la microestructura afectan la permeabilidad y coercitividad del material.
- La formación de martensita disminuye la amplitud de ruido barkhausen.
- En presencia de carburos o nitruros disminuye la amplitud de ruido Barkhausen.
- Variaciones en tamaño de grano; Berotti investigó el tamaño de grano en ruido Barkhausen, observando que los límites de grano son fuentes probables para la fijación de la pared de dominio. Confirmó que un gran número de límite de grano resultó en emisiones de ruido Barkhausen más intensas. El gran número de fronteras se encuentra en las muestras con tamaños de grano más pequeños que han sido recocidos a temperaturas más bajas. Las muestras de grano pequeños tienen mayor señal de ruido Barkhausen porque los limites actúan como sitios de fijación, y puesto que el volumen fraccionario es mayor, más sitios de fijación tienen que superar cuando las paredes se mueven. El tamaño de grano influye en el número de defectos en la muestra y por lo tanto, sus propiedades magnéticas.

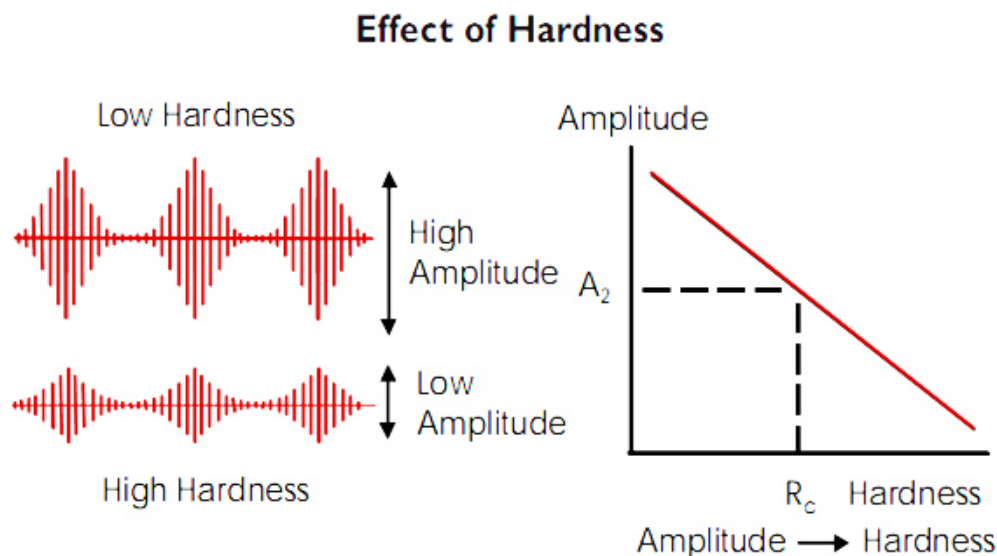


Figura 19.- Efectos de microestructura en el ruido Barkhausen

# **CAPÍTULO 3.- EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.**

## **3.1.-INTRODUCCIÓN A LA EXPERIMENTACIÓN.**

Como se mencionó anteriormente, existe una necesidad tecnológica de desarrollar y validar que tan fiable es implementar esta tecnología de Barkhausen en una línea de producción. Actualmente en la industria nos encontramos con defectos metalúrgicos que intervienen en la calidad de las piezas de trabajo y esto hace que se reduzca la vida útil de la misma pieza.

## **3.2.- METODOLOGIA**

En este proyecto se plantearon 2 etapas, las cuales consiste en lo siguiente:

La primera etapa corresponde a este tema de tesis; para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la ingeniería Automotriz que consiste en la validación del sensor Barkhausen para detección de martensita reformada. Con apoyo del departamento de Manufactura se pudieron maquinar flechas de transmisión con parámetros de corte agresivos con el fin de generar la capa blanca de martensita en zonas específicas de la misma flecha de transmisión para poder obtener diferentes espesores de este fenómeno metalúrgico y poder evaluarlo mediante el sensor.

La segunda etapa se puede tomar como la continuación de este proyecto, pudiendo quedar como un tema de tesis para obtener un grado de Doctorado; el cual tiene como objetivo poder detectar esfuerzos residuales generados después del proceso de rectificado en las flechas de transmisión. Ya que estos esfuerzos residuales mencionados son de vital importancia porque en la actualidad no se sabe con exactitud de que magnitud y a que profundidad se encuentran; cabe mencionar que los esfuerzos residuales de tensión son los más peligrosos porque por estos esfuerzos pueden ser la causa raíz de iniciación de alguna micro-grieta pudiendo llevar a la ruptura del componente y se busca que el equipo Barkhausen pueda detectarlos.

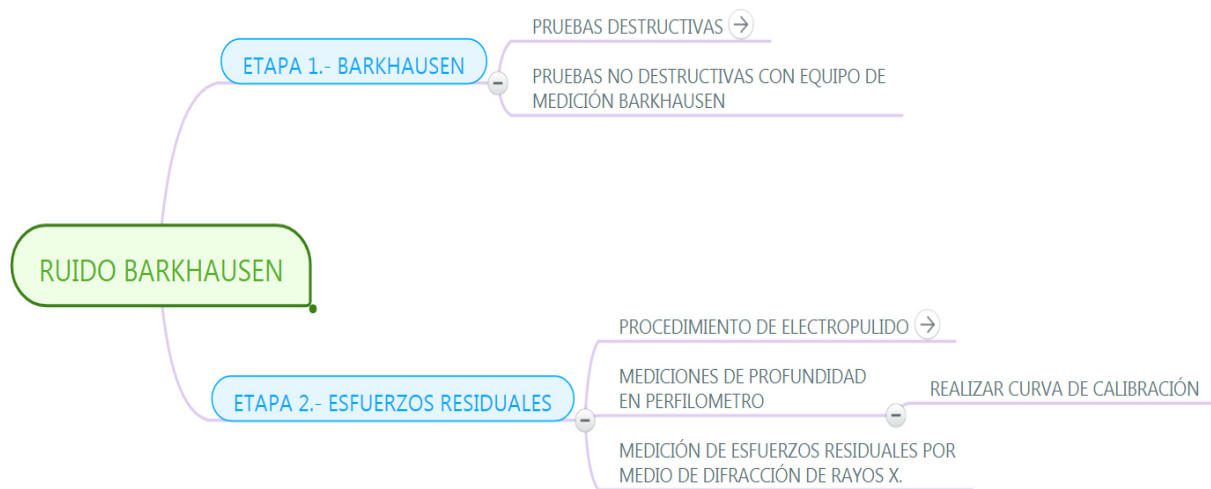


Figura 20.- Metodología planteada.

Como se mencionó anteriormente, para los experimentos se realizó el procesos de torneado en duro con diferentes parámetros de corte para así generar diferentes propiedades de capa blanca de martensita “White layer” tales como: espesor, capa continua, capa discontinua.

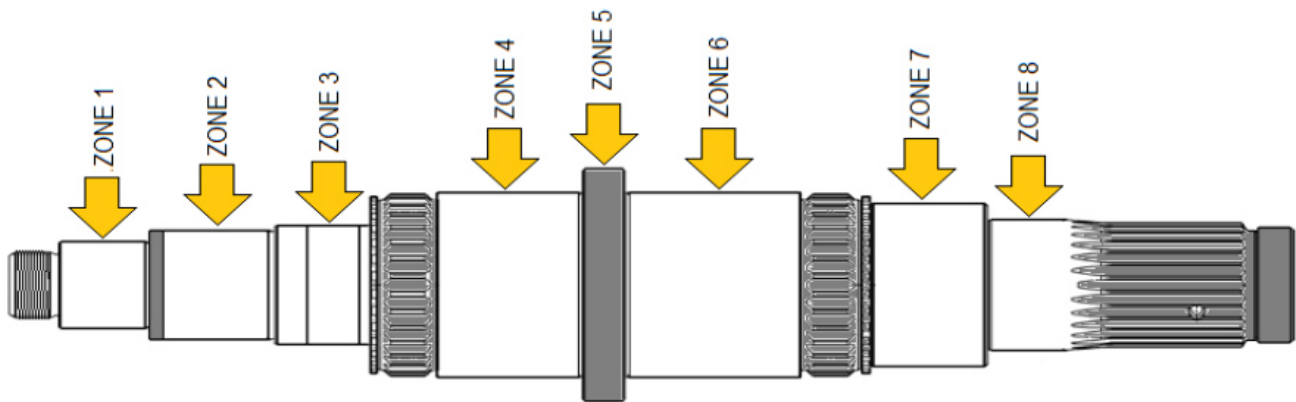


Figura 21.- Esquema de flecha de transmisión. Zonas maquinadas con parámetros agresivos en los experimentos (zona 4, 5 y 6)

Para hacer la validación de que la capa blanca de martensita se presentó en el proceso de rectificado, se tuvo que realizar el procedimiento convencional de realizar secciones transversales y atacar químicamente el material con nital al 4% para revelar la microestructura y así poder analizarla.

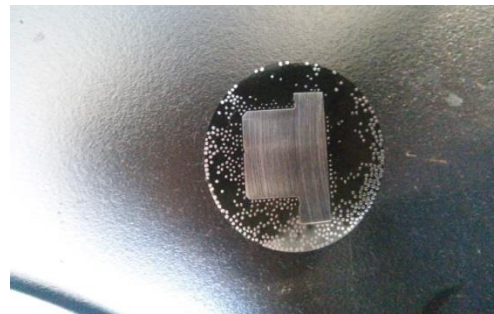
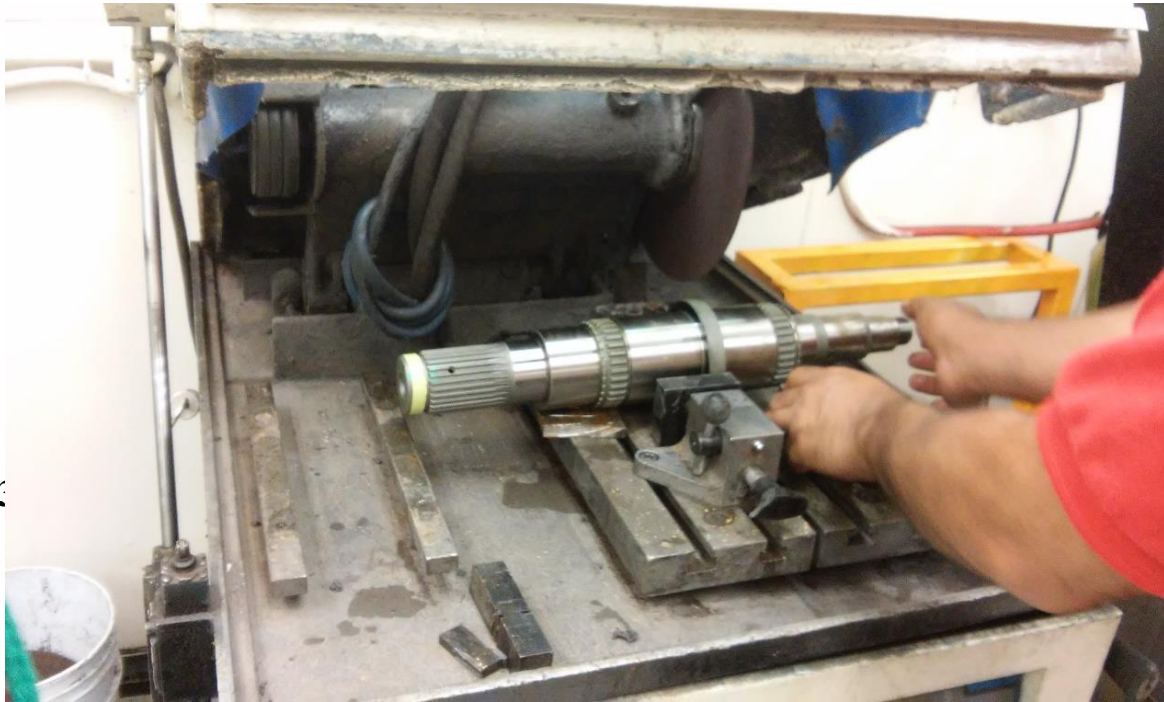
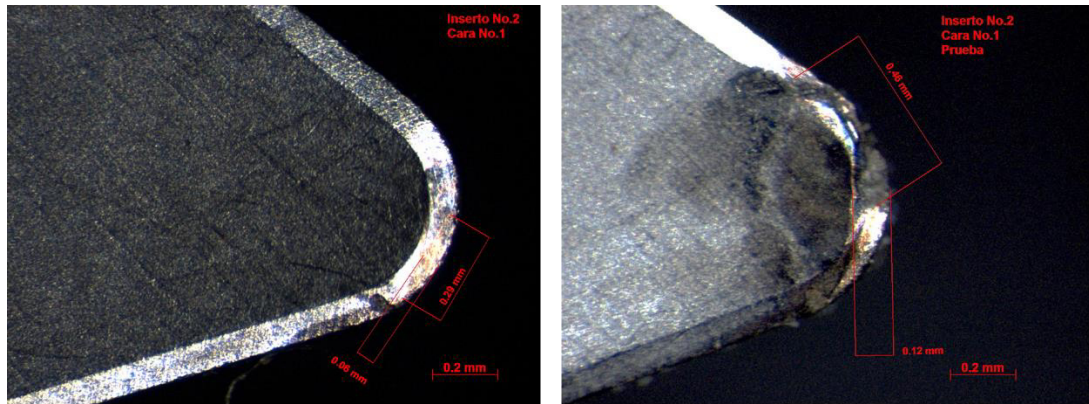


Figura 22.- Proceso de montaje para evaluación microestructural.

Para realizar la experimentación de este proyecto se empleó un inserto gastado utilizado en línea de producción el cual cumplió su vida útil. Se utilizó dicho inserto con el objetivo de poder ejecutar las peores condiciones de corte, buscando generar Martensita reformada. A continuación se muestra la imagen del inserto utilizado en la experimentación antes y después de los experimentos. A continuación se muestran imágenes y resultados de las experimentaciones realizadas en este proyecto así como los parámetros de corte que se utilizaron.



a)

b)

Figura 23.- a) Inserto antes de la experimentación

b) Inserto después de la experimentación

<u>Factores</u>	<u>Unidad</u>	<u>Nivel I</u>	<u>Nivel II</u>	<u>Nivel III</u>
<i>Velocidad de corte (S)</i>	m/min	152	180	230
<i>Avance (f)</i>	mm/rev	0.05	0.102	0.3
<i>Profundidad de corte(ap)</i>	mm	0.1	0.2	0.3

Tabla 1.- Tabla de factores utilizados en el proceso de corte

### 3.3.- METALOGRAFIAS.

#### -Experimento 1.

<u>No. Exp</u>	<u>S [m/min]</u>	<u>f [mm/rev]</u>	<u>ap [mm]</u>
1	230	0.07	0.2

Tabla 2.- Parámetros de corte en experimento 1.



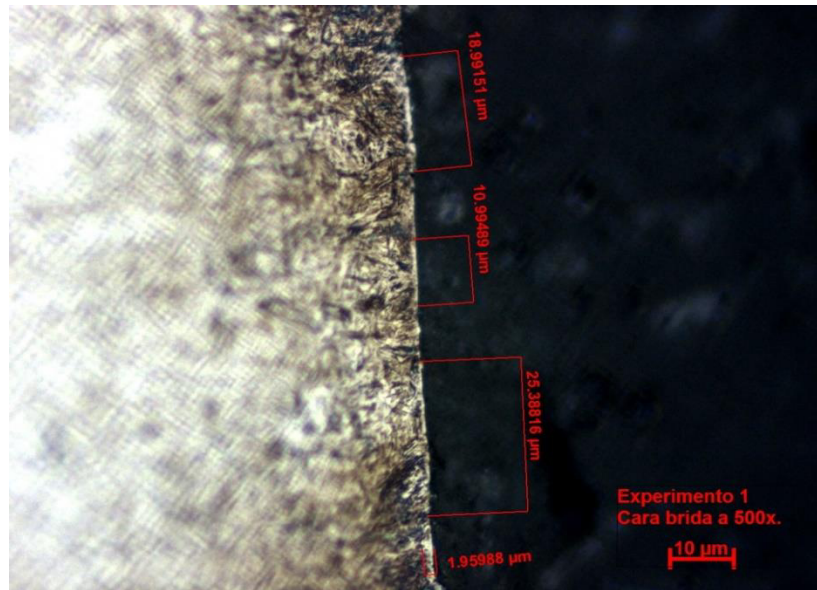


Figura 24 a.- Cara Brida a 500x de resolución.

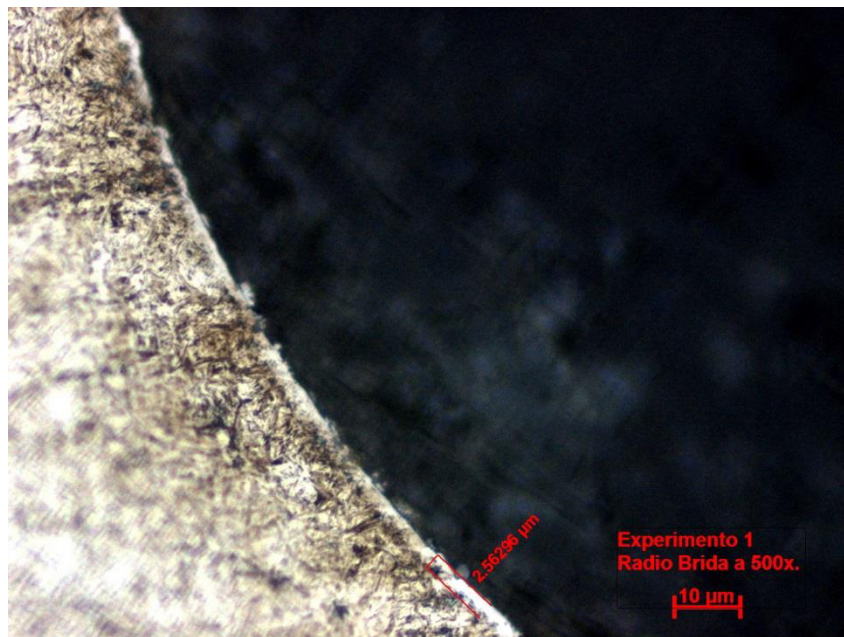


Figura 24 b.- Radio Brida a 500x de resolución.



La mayoría de las veces, este defecto metalúrgico ocurre específicamente en una zona de la pieza, que es en los cambios de sección (radios y caras de la brida). Como se observa en las imágenes mostradas anteriormente en la cara de la brida se alcanza a ver un espesor de  $1.95\ \mu\text{m}$  con una longitud sobre la superficie discontinua de hasta  $25.38\ \mu\text{m}$  y en el radio se generó un espesor de capa blanca de  $2.56\ \mu\text{m}$ .

## -Experimento 2.

<u>No. Exp</u>	<u>S [m/min]</u>	<u>f [mm/rev]</u>	<u>ap [mm]</u>
2	230	0.07	0.3

Tabla 3.- Parámetros de corte en experimento 2.

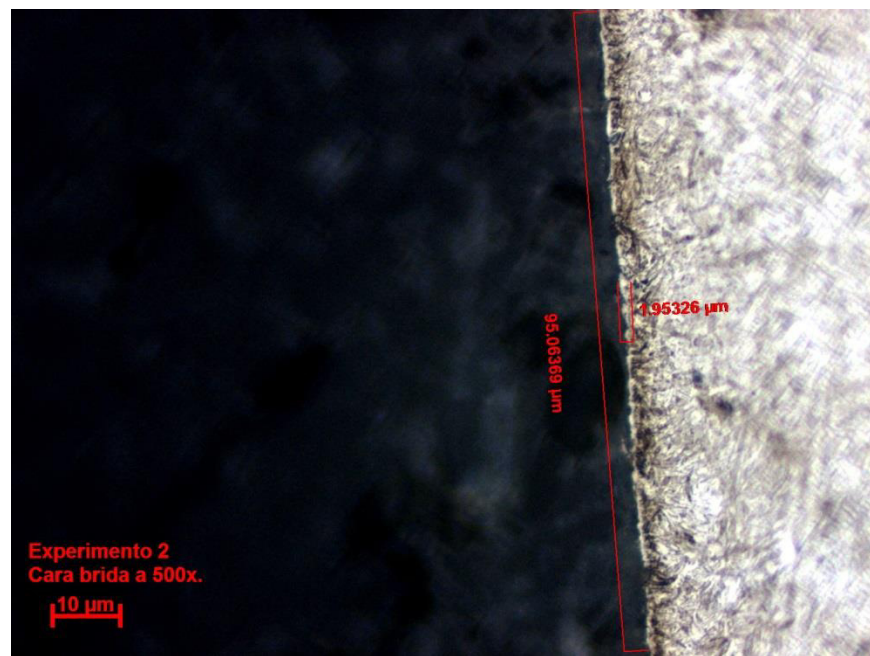


Figura 25 a.- Cara Brida a 500x de resolución.



Figura 25 b.- Radio brida a 500x de resolución.

En este experimento se observó los siguientes resultados con los parametros de corte presentados anteriormente: en la cara de la brida se observa una capa blanca de  $1.95\ \mu m$  de espesor y una longitud superficial de  $95\ \mu m$ , mientras que en el radio se observa un espesor de  $1.6\ \mu m$  de espesor.

### -Experimento 3.

<u>No. Exp</u>	<u>S [m/min]</u>	<u>f [mm/rev]</u>	<u>ap [mm]</u>
3	230	0.05	0.3

Tabla 4.- Parámetros de corte en experimento 3.

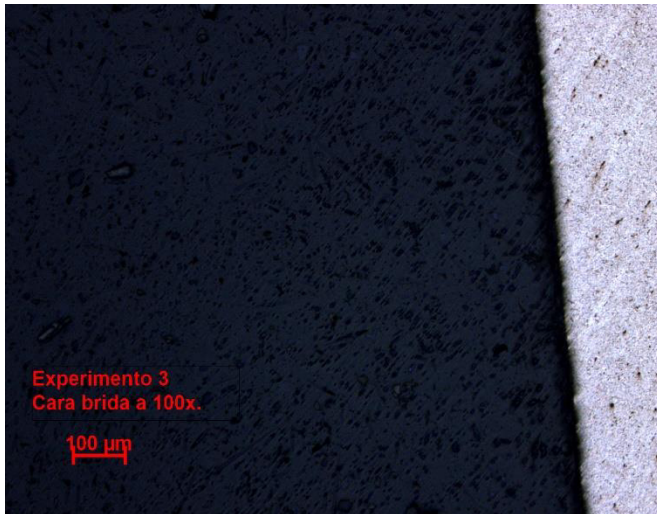


Figura 26 a.- Cara brida a 100x de resolución.

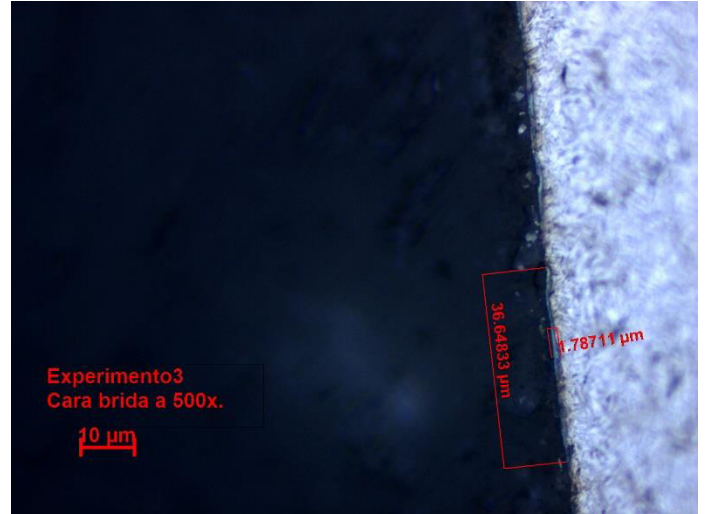


Figura 26 b.- Cara brida a 500x de resolución.



Figura 26 c.- Radio brida a 100x de resolución.

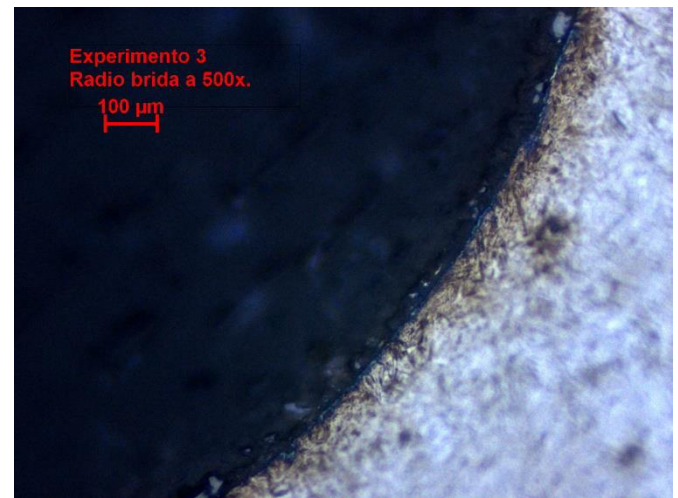


Figura 26 d.- Radio brida a 500x de resolución.

Con estos parametros de corte no se observo indicaciones de martensita reformada ni en los radios ni caras de la brida.



## -Experimento 4.

<u>No. Exp</u>	<u>S [m/min]</u>	<u>f [mm/rev]</u>	<u>ap [mm]</u>
4	230	0.3	0.3

Tabla 5.- Parámetros de corte en experimento 4.

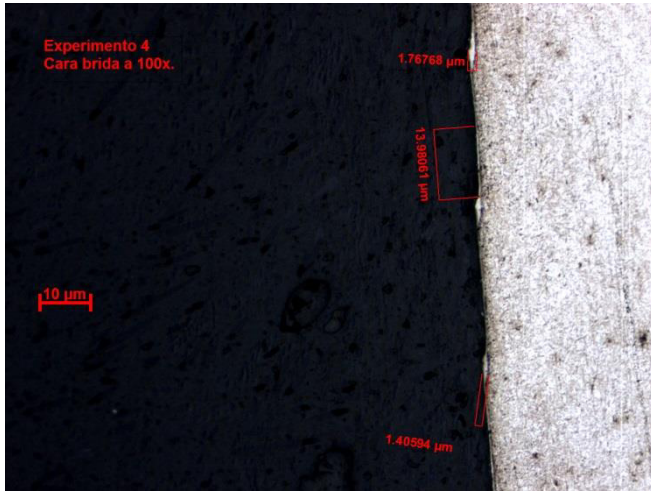


Figura 27 a.- Cara brida a 100x de resolución.

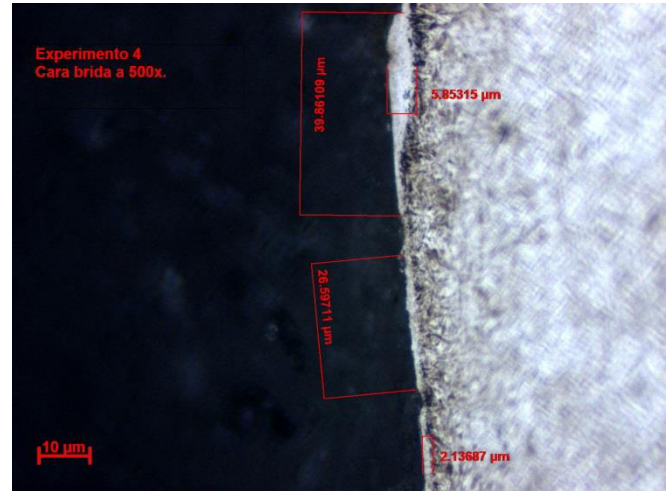


Figura 27 b.- Cara brida a 500x de resolución.



Figura 27 c.- Radio brida a 100x de resolución.

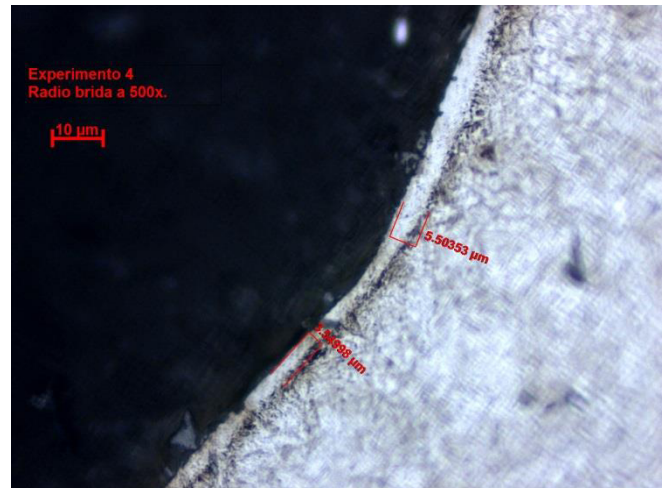


Figura 27 d.- Radio brida a 500x de resolución.

Con estos parametros de corte utilizados se pudo observar que a una resolucion de 100x en el microscopio ya se alcanza a percibir precencia de martensita reformada; con mas exactitud en el microscopio usamos un lente

de 500x para ver con mas precision las propiedades de este defecto metalurgico, obteniendo así los siguientes resultados: en la cara se observa un espesor de 2.13a 5.8  $\mu\text{m}$  ,con diferentes longitudes superficiales (discontinuas). En el radio se encontró una capa blanca continua de espesor de hasta 5.5  $\mu\text{m}$ .

### -Experimento 5.

<u>No. Exp</u>	<u>S [m/min]</u>	<u>f [mm/rev]</u>	<u>ap [mm]</u>
5	230	0.102	0.3

Tabla 6.- Parámetros de corte en experimento 5.

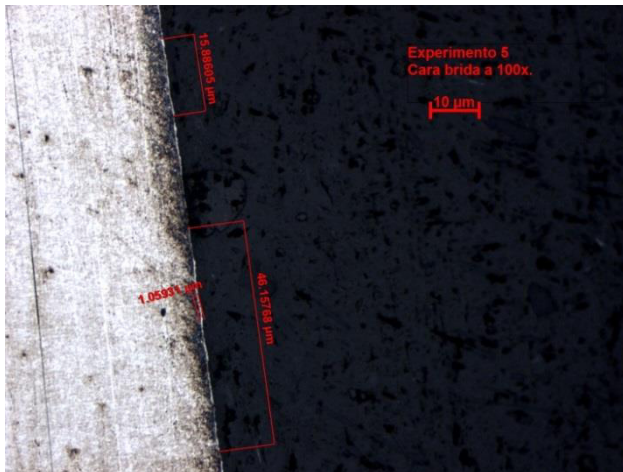


Figura 28 a.- Cara brida a 100x de resolución.

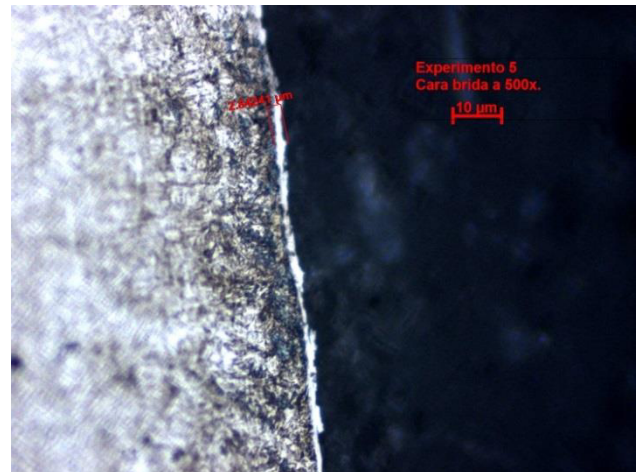


Figura 28 b.- Cara brida a 500x de resolución.

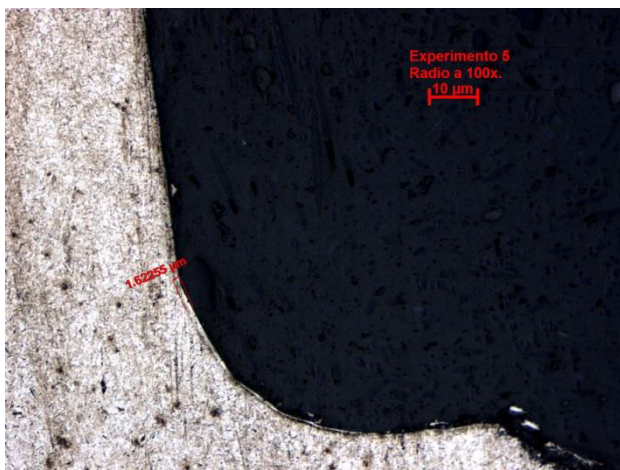


Figura 28 c.- Radio brida a 100x de resolución.

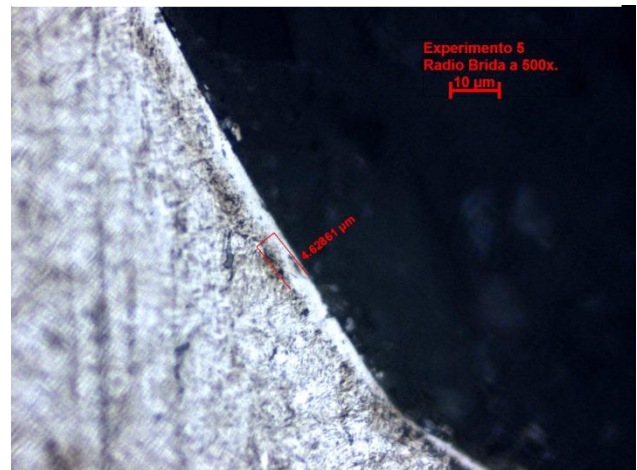


Figura 28 d.- Radio brida a 500x de resolución.



Al igual que en la experimentación anterior, bastó con colocar el microscopio con una resolución de 100x para observar la capa blanca de martensita; dando los siguientes resultados: en la cara se aprecia un espesor de  $2.85\ \mu\text{m}$  con una longitud superficial continua de hasta  $46\ \mu\text{m}$ ; mientras en el radio se observa un espesor de capa de casi  $5\ \mu\text{m}$ .

### -Experimento 6.

<u>No. Exp</u>	<u>S [m/min]</u>	<u>f [mm/rev]</u>	<u>ap [mm]</u>
6	152	0.05	0.3

Tabla 7.- Parámetros de corte en experimento 6.



Figura 29 a.- Cara brida a 100x de resolución.

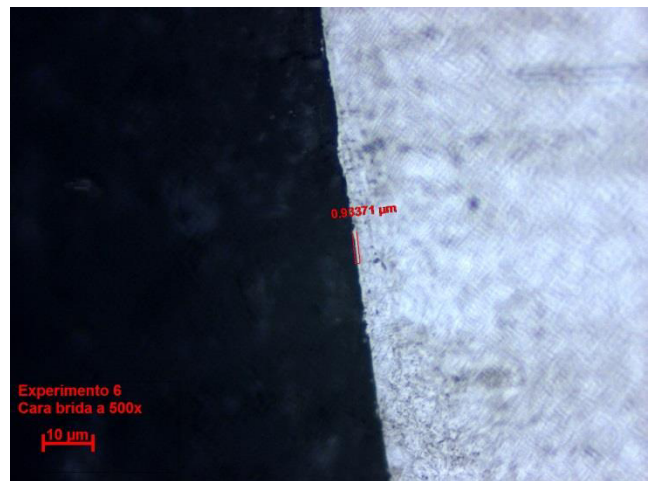


Figura 29 b.-Cara brida a 500x de resolución.

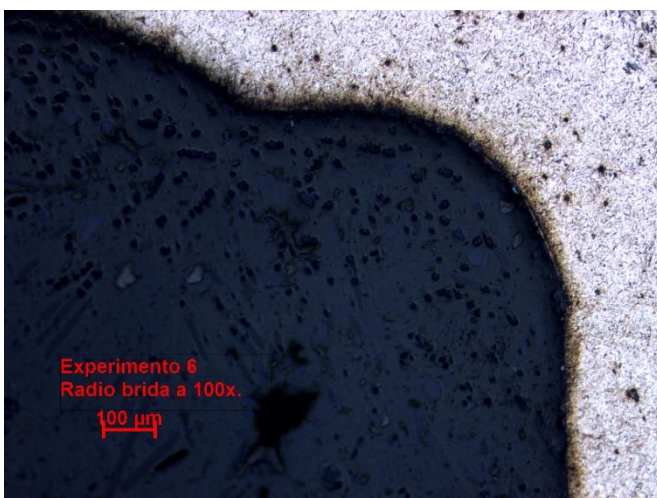


Figura 29 c.- Radio brida a 100x de resolución.

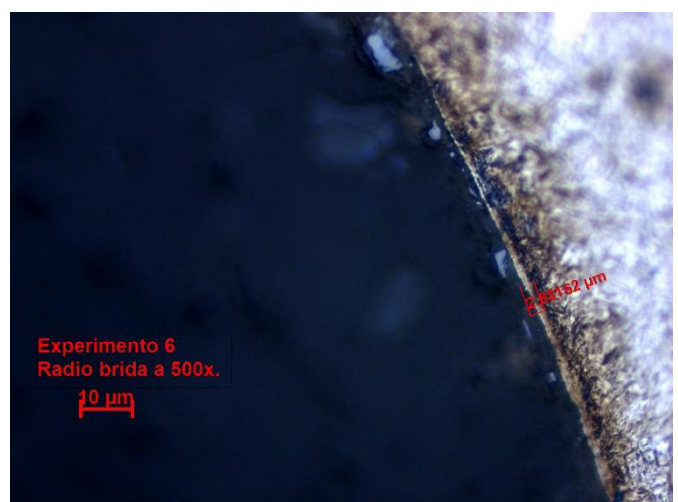


Figura 29 d.- Radio brida a 500x de resolución.

Como se observa en las imágenes con una resolución de 100x en ambos casos: de la cara y radio de la brida no se alcanza a percibir este fenómeno, pero a una resolución de 500x captamos presencia de capa blanca en la zona del radio de la brida con un espesor de  $2.8\text{ }\mu\text{m}$ .

### -Experimento 7.

<u>No. Exp</u>	<u>S [m/min]</u>	<u>f [mm/rev]</u>	<u>ap [mm]</u>
7	180	0.05	0.3

Tabla 8.- Parámetros de corte en experimento 7.

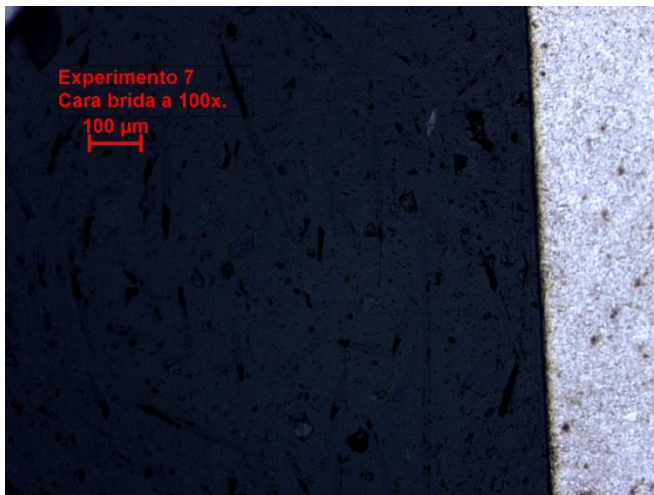


Figura 30 a.- Cara brida a 100x de resolución.

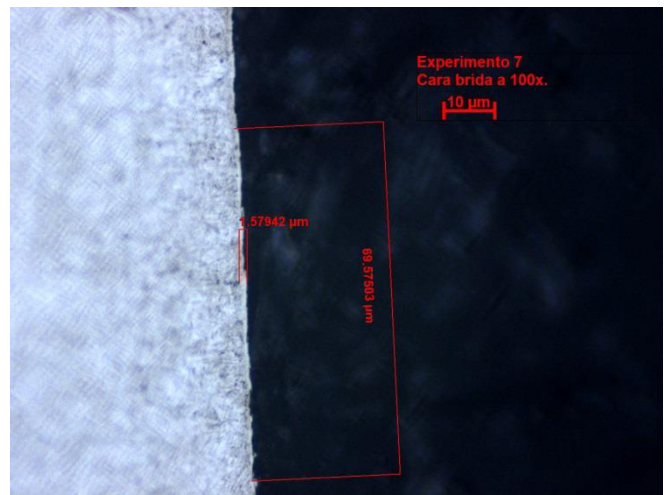


Figura 30 b.- Cara brida a 500x de resolución.

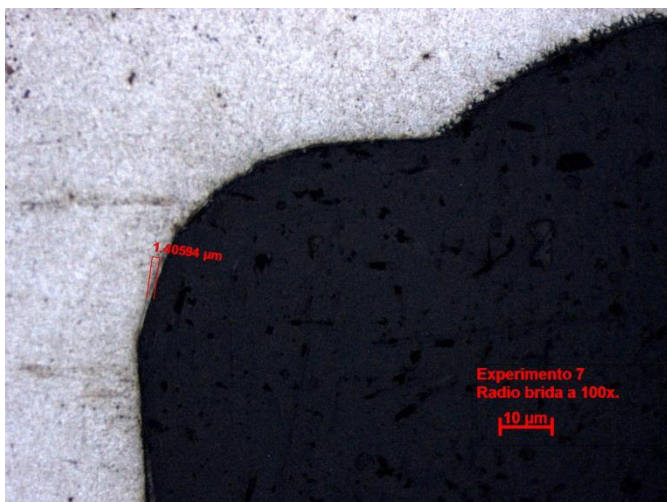


Figura 30 c.- Radio brida a 100x de resolución.

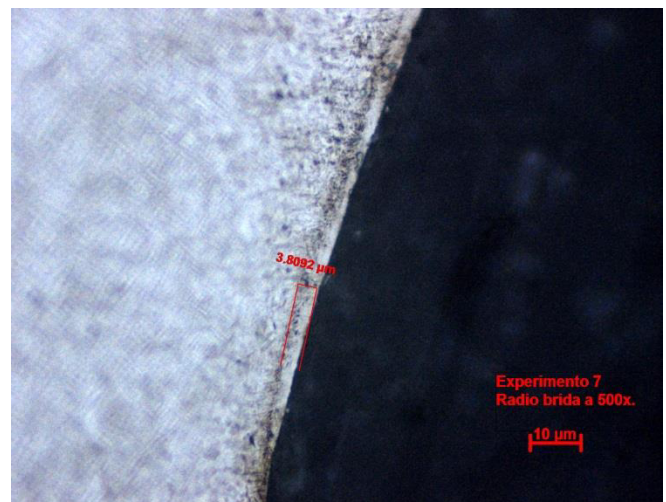


Figura 30 d.- Radio brida a 500x de resolución.



En la cara de la brida se aprecia presencia de martensita reformada con un espesor de  $1.58\ \mu\text{m}$  con una longitud superficial de hasta  $70\ \mu\text{m}$ ; mientras que en el radio se presenta la capa blanca con un espesor de  $3.8\ \mu\text{m}$ .

### -Experimento 8.

<u>No. Exp</u>	<u>S [m/min]</u>	<u>f [mm/rev]</u>	<u>ap [mm]</u>
8	180	0.05	0.1

Tabla 9.- Parámetros de corte en experimento 8.



Figura 31 a.- Cara brida a 100x de resolución.

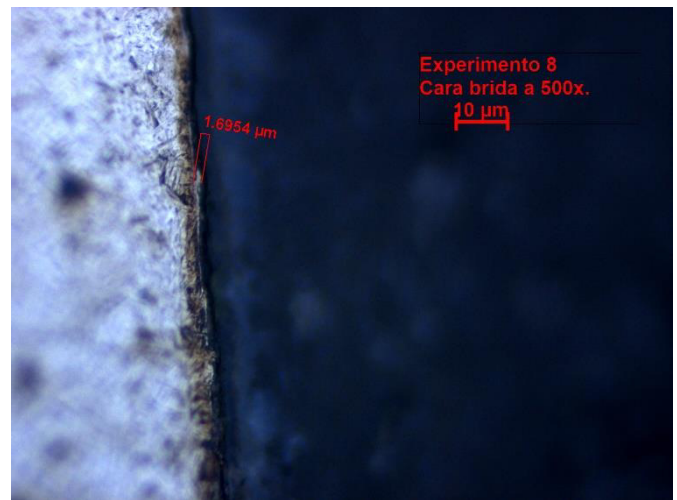


Figura 31 b.- Cara brida a 500x de resolución.

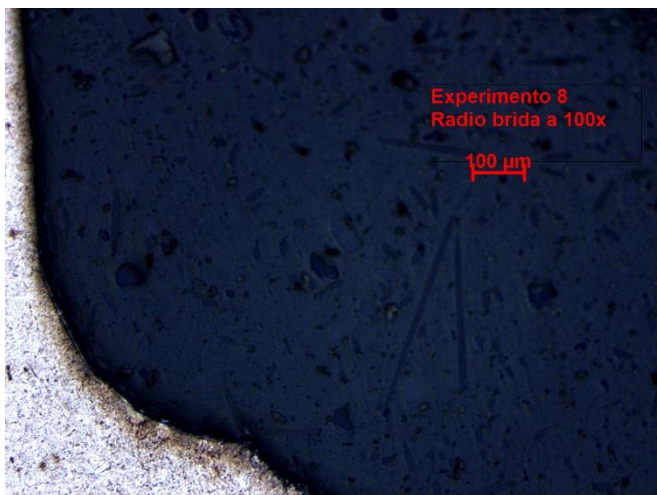


Figura 31 c.- Radio brida a 100x de resolución.

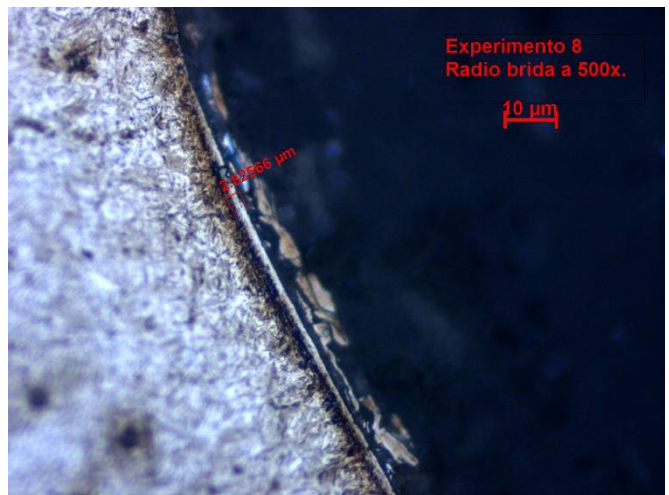


Figura 31 d.- Radio brida a 500x de resolución.



A una resolución de 500 x se puede observar martensita reformada en el radio seguido de una capa negra que es conocida como “quemado por rectificado”.

### -Experimento 9.

<u>No. Exp</u>	<u>S [m/min]</u>	<u>f [mm/rev]</u>	<u>ap [mm]</u>
8	152	0.05	0.2

Tabla 10.- Parámetros de corte en experimento 9.

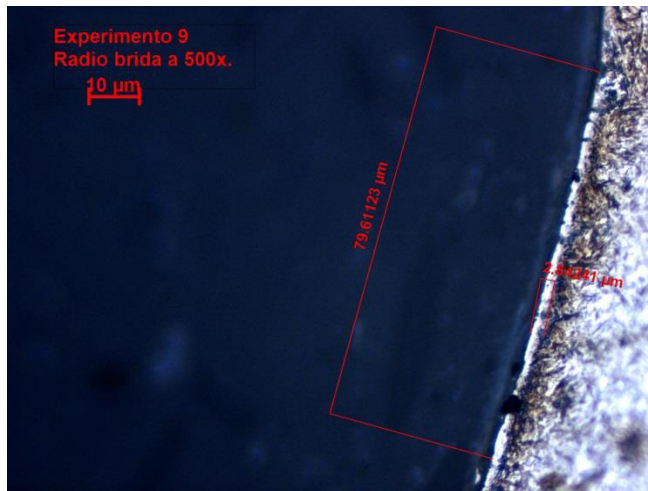


Figura 32 a.- Radio brida a 500x de resolución.

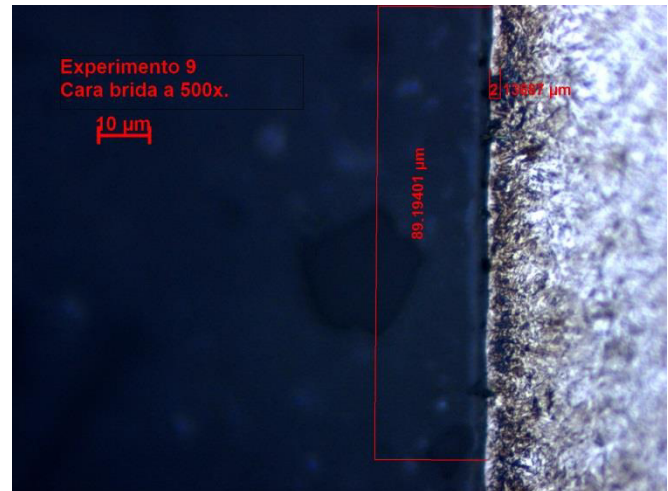


Figura 32 b.- Cara brida a 500x de resolución.

### 3.4.- MEDICIONES DE TEMPERATURA CON CÁMARA TERMOGRÁFICA.

Durante la experimentación se utilizó la cámara térmica con el propósito de apreciar la temperatura que se puede alcanzar en el proceso de torneado en duro, ya que se creó que estas temperaturas son parte fundamental de la aparición de la capa blanca de martensita. Debido a que se necesitó tiempo para la calibración de la cámara térmica no fue posible medir la temperatura en todos los experimentos. Pero si fue posible capturar temperaturas cercanas a la zona de corte, donde se alcanzan mediciones aproximadas a los 700 grados Celsius, es de suponer que a temperatura en la zona de corte debe ser mucho mayor a las registradas por la cámara. Después de alcanzar los 700 grados Celsius el acero comienza su etapa de transformación como se aprecia en la zona A1 del diagrama hierro-carbono.

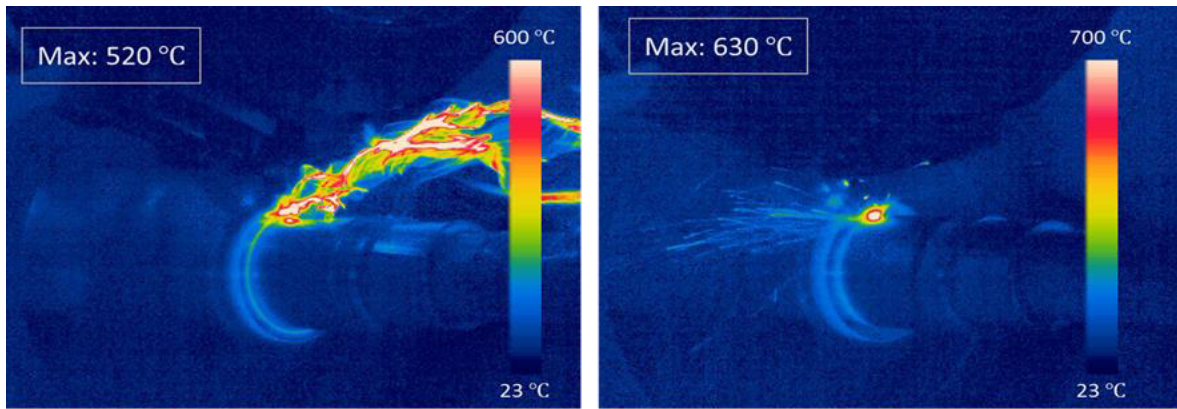


Figura 34.- Imágenes termo-Graficas del experimento 2,  $S= 230$  m/min;  $f= 0.07$  mm/rev;  $ap= 0.3$  mm

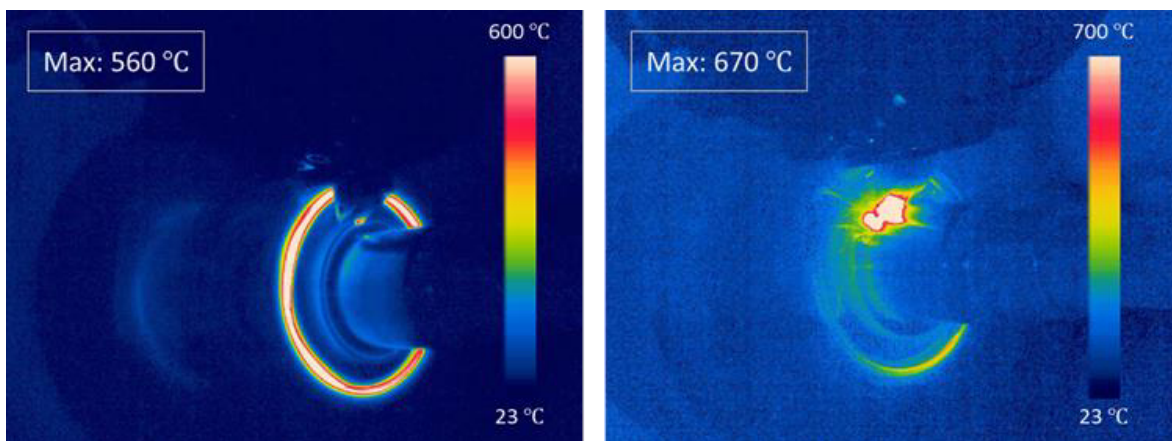


Figura 35.- Imágenes termo-Graficas del experimento 4,  $S= 230$  m/min;  $f= 0.3$  mm/rev;  $ap= 0.3$  mm

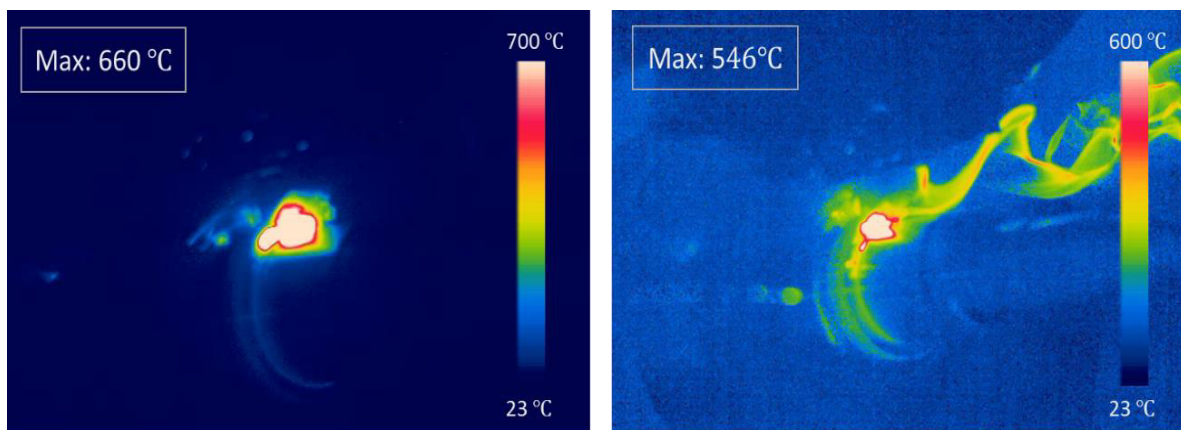


Figura 36.- Imágenes termo-Graficas del experimento 7,  $S= 152$  m/min;  $f= 0.05$  mm/rev;  $ap= 0.2$  mm

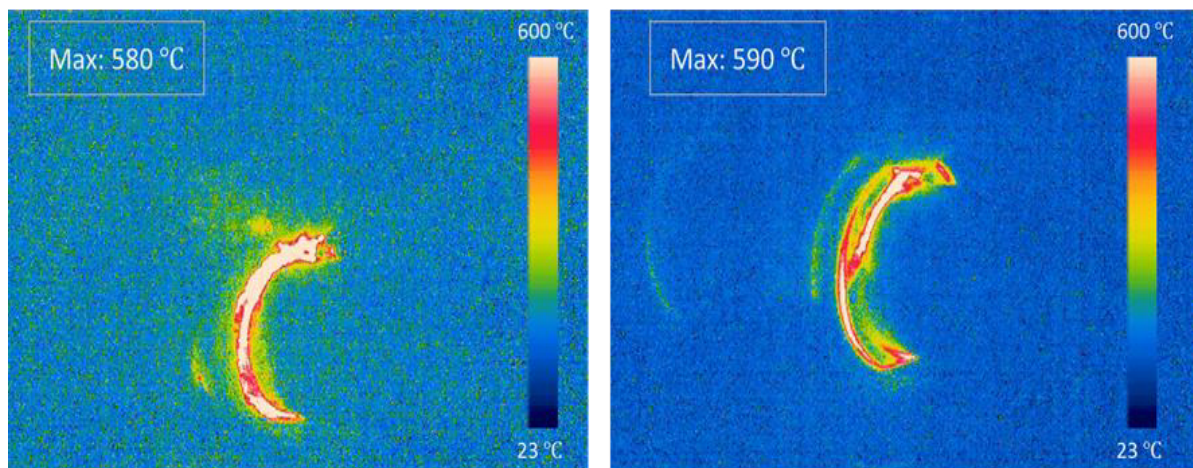


Figura 37.- Imágenes termo-Graficas del experimento 9,  $S= 152$  m/min;  $f= 0.05$  mm/rev;  $ap= 0.2$  mm

A continuacion se muestra una tabla de los resultados de cada una de las experimetaciones realizadas, y las propiedades de la martensita reformada que se genero a causa de los parametros de corte seleccionados para dicha experimentacion.

No. Exp	$S$ [m/min]	$f$ [mm/rev]	$ap$ [mm]	Martensita Reformada				
				Cara Brida (espesor)	Cara brida (longitud)	radio (espesor)	continua	discontinua
1	230	0.07	0.2	1.95	25.38	2.56		x
2	230	0.07	0.3	1.953	95	1.59	x	
3	230	0.05	0.3	0	0	0	N/A	N/A
4	230	0.3	0.3	5.85	39.86	5.5		x
5	230	0.102	0.3	2.84	46.15	4.62	x	
6	152	0.05	0.3	0	0	2.88	x	
7	180	0.05	0.3	1.57	69.57	3.8	x	
8	180	0.05	0.1	1.7	12	2.82		x
9	152	0.05	0.2	2.3	90	2.84	x	

Tabla 11.- Tabla de resultados de los experimentos.

### 3.5.- MEDICIONES DE RUIDO BARKHAUSEN.

Antes que nada se obtuvo la optima curva de magnetizacion para el material de la flecha de transmision para que las mediciones fueran las correctas y determinar en que rango de voltaje y frecuencia son los mejores para trabajar.

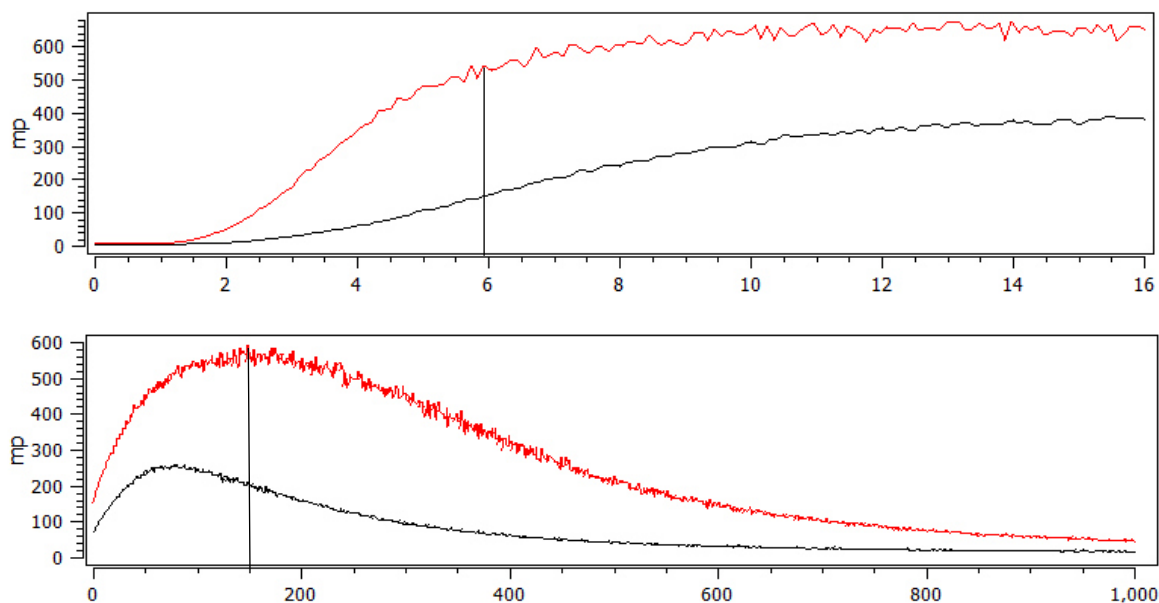


Figura 38.- Voltaje y frecuencia de Barrido

Para las mediciones de ruido Barkhausen fueron tomadas alrededor de 15 flechas de transmision de la linea de producción listas para entrega a cliente; esto quiere decir que estan libres de este defecto metalúrgico y se usaron como referencia para ver la diferencia que existe entre estas 15 piezas y los 9 experimentos realizados en este proyecto.



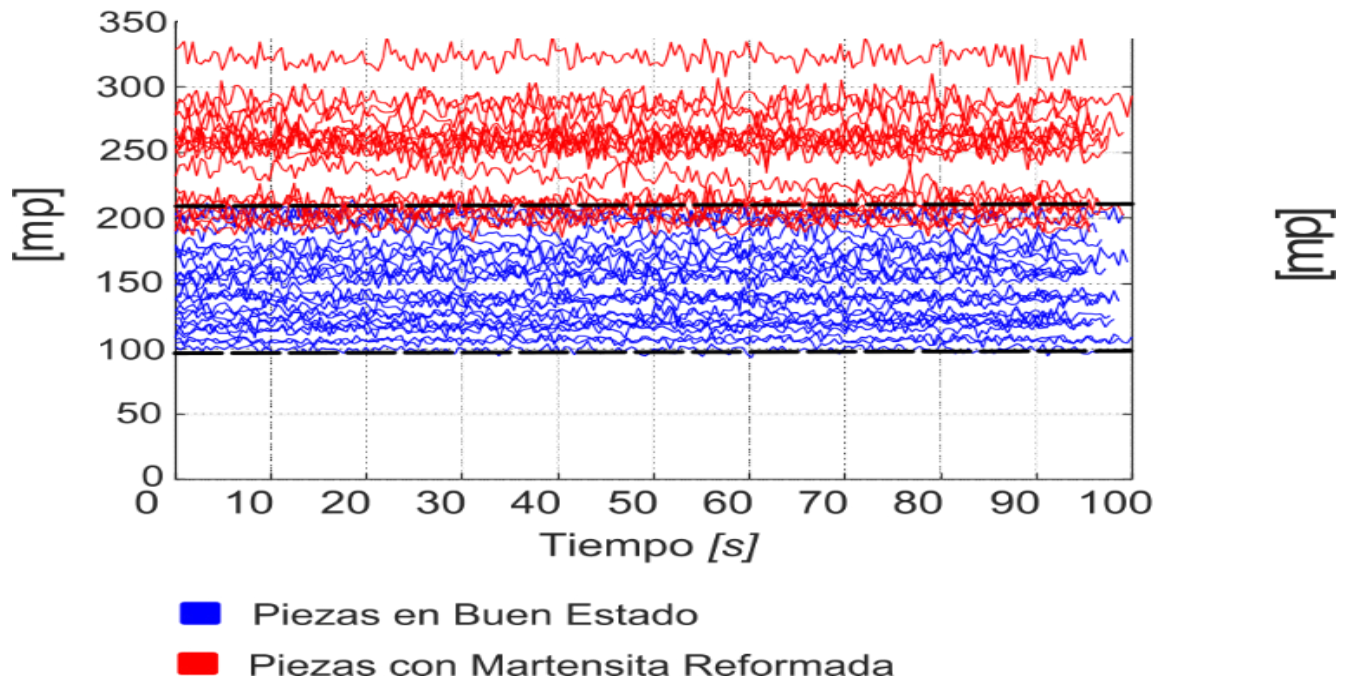


Figura 39.-Mediciones de Ruido Barkhausen en 15 piezas de línea de Producción y los 9 experimentos.

Las mediciones de ruido barkhausen de los experimentos se muestran en la siguiente grafica.

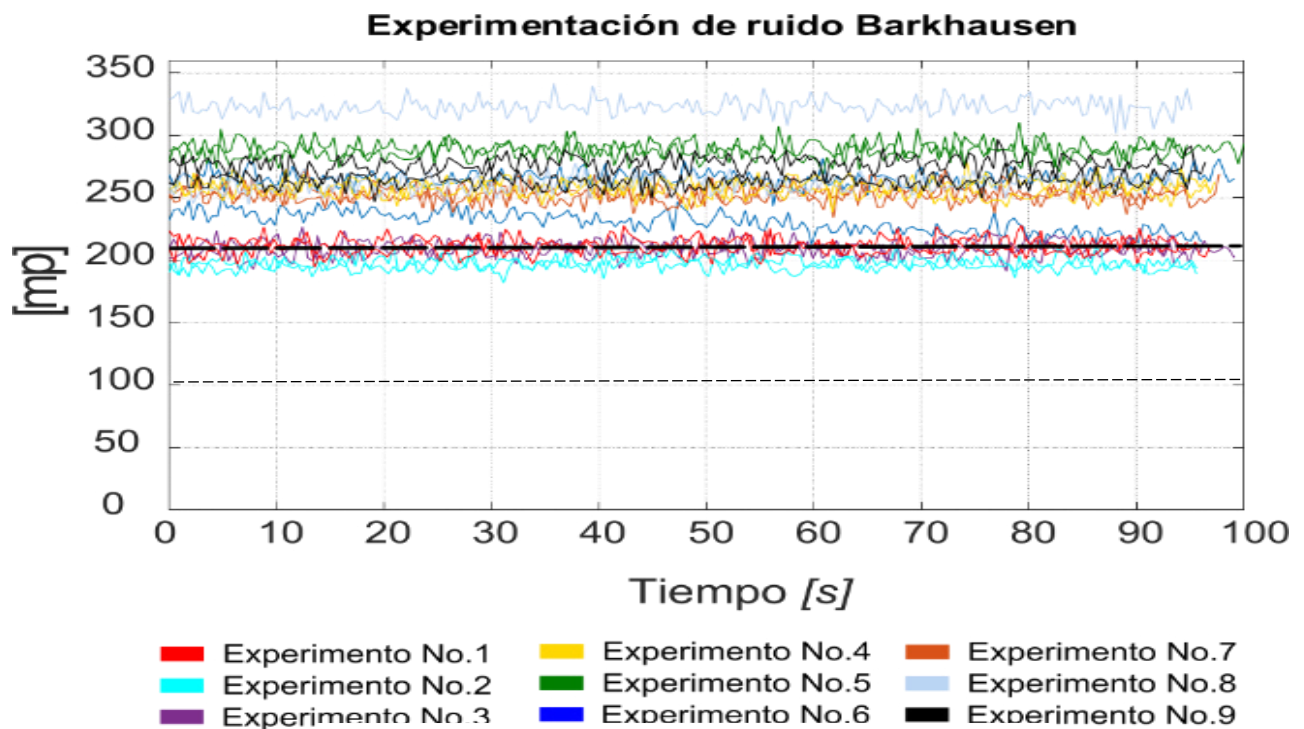


Figura 40.-Experimentacion de ruido Barkhausen

Mediante la señal obtenida de estas experimentaciones pretendemos correlacionar la amplitud de la señal arrojada por el sensor con los diferentes espesores de capa blanca de tal manera que esta señal generada nos de la magnitud de el espesor y longitud de martensita reformada.

Viendo el grafico de la figura 41 se puede observar claramente que los experimentos caen fuera del rango de la condición de buen estado, viendo la tabla de la figura 38 podemos observar que, mientras el componente tenga más capa blanca de martensita reformada, la señal adquirida por el sensor Barkhausen estará en un rango más lejos de la zona estable; pudiendo concluir con esto que el Ruido Barkhausen es confiable para implementarse como una Prueba No Destructiva para evaluación de defectos internos en materiales ferromagnéticos.

### 3.6.- GRADIENTES DE DUREZA.

Se realizaron gradientes de Dureza con una carga de 0.01 g y 0.02 mm entre indentación del penetrador en los experimentos, con el fin de poder determinar si este defecto metalúrgico afecta la vida a la fatiga de los componentes y ver la dureza de la capa blanca de martensita.

Exeperimento 1 radio	Dureza RC
	46.74
	48.26
	49.8
	46.74
	39.2
	32.2
	42.25
	45.22
	48.26
	42.25

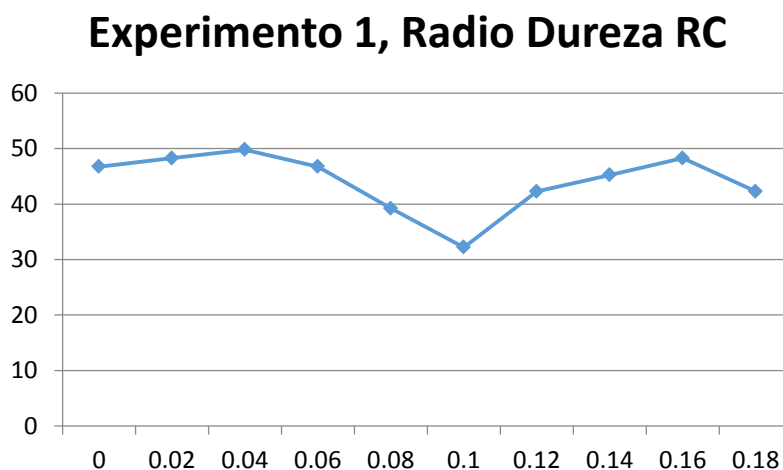


Tabla 12.-Gradiente de Dureza Experimentación 1

Exeperimento 2 radio	Dureza RC
	57.35
	57.35
	52.79
	43.69
	45.22
	45.22
	33.52
	33.52
	45.22
	31

**Experimento 2 radio Dureza RC**

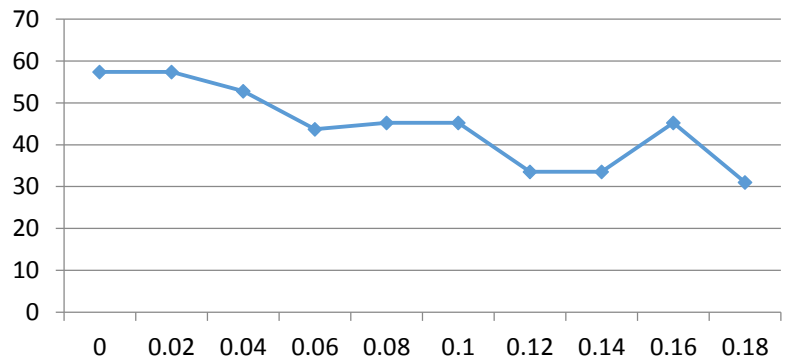


Tabla 13.-Gradiente de Dureza Experimentación 2

Exeperimento 3 radio	Dureza RC
	58.96
	58.96
	51.22
	58.96
	55.76
	46.74
	37.7
	33.52
	32.2
	34.84

**Experimento 3 radio Dureza RC**

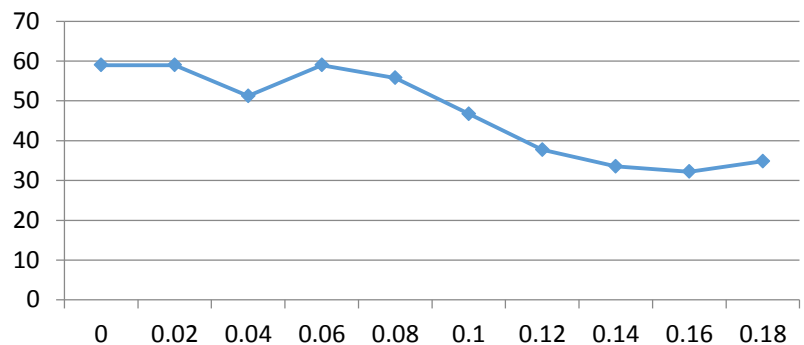


Tabla 14.-Gradiente de Dureza Experimentación 3

Exeperimento 4 radio	Dureza RC
	49.8
	55.76
	43.69
	43.69
	48.26
	32.53
	42.25
	32.2
	36.16
	36.16

**Experimento 4 radio Dureza RC**

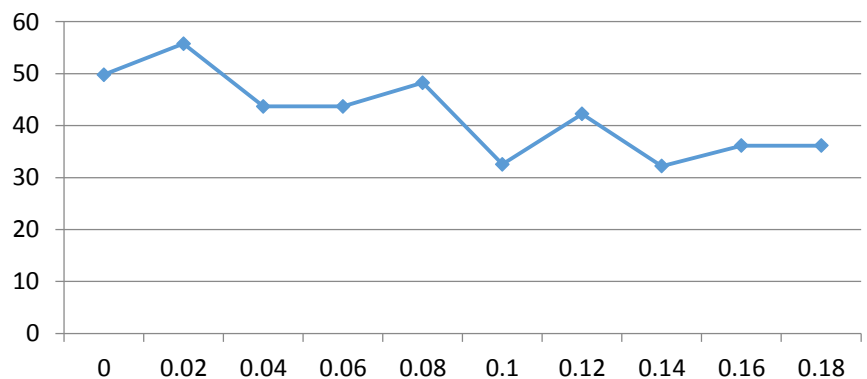


Tabla 15.-Gradiente de Dureza Experimentación 4

Exeperimento 5 radio	Dureza RC
	45.22
	49.8
	46.74
	40.7
	43.69
	43.69
	42.25
	42.25
	34.84
	34.84

**Experimento 5 radio Dureza RC**

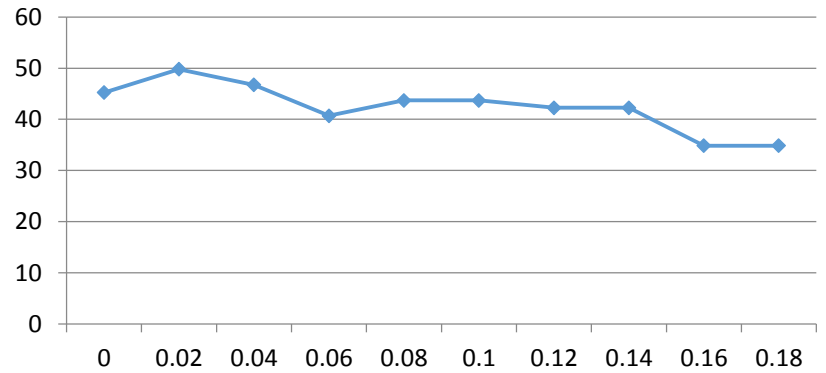


Tabla 16.-Gradiente de Dureza Experimentación 5

Exeperimento 6 radio	Dureza RC
	58.96
	52.79
	54.28
	55.76
	52.79
	43.69
	42.25
	34.84
	37.7
	29.68

**Experimento 6 radio Dureza RC**

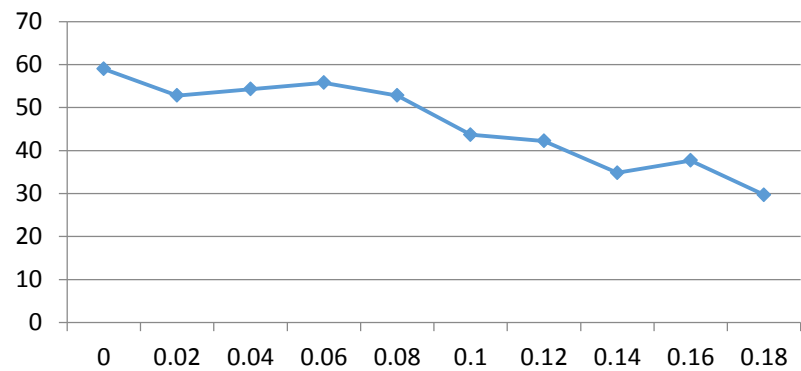


Tabla 17.-Gradiente de Dureza Experimentación 6

Exeperimento 7 radio	Dureza RC
	29.68
	36.16
	45.22
	34.84
	40.7
	39.2
	42.25
	40.7
	37.7
	33.52

**Experimento 7 radio Dureza RC**

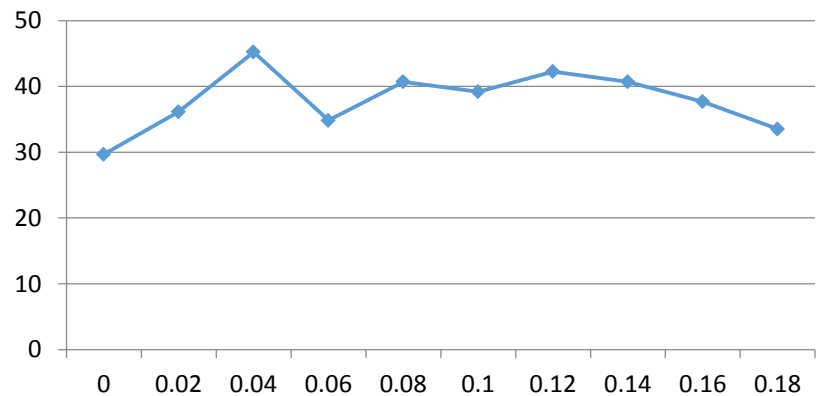


Tabla 18.-Gradiente de Dureza Experimentación 7



Exeperimento 8 radio	Dureza RC
	49.8
	43.69
	43.69
	40.7
	48.26
	46.74
	46.74
	46.74
	42.25
	40.7

**Experimento 8 radio Dureza RC**

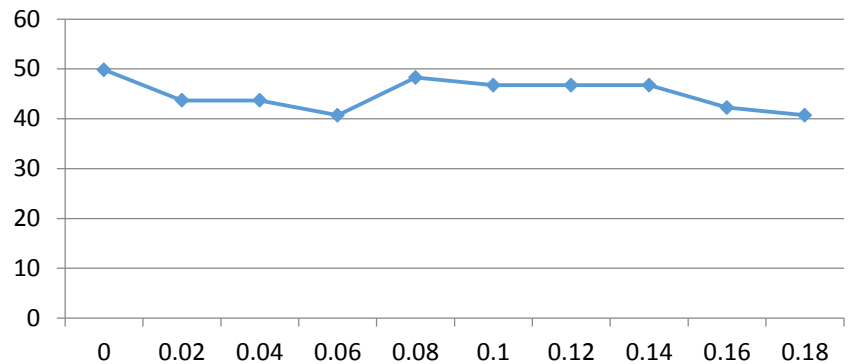


Tabla 19.-Gradiente de Dureza Experimentación 8

Exeperimento 9 radio	Dureza RC
	36.16
	44.41
	48.26
	42.25
	45.22
	43.66
	45.22
	34.84
	46.74
	42.25

**Experimento 9 radio Dureza RC**

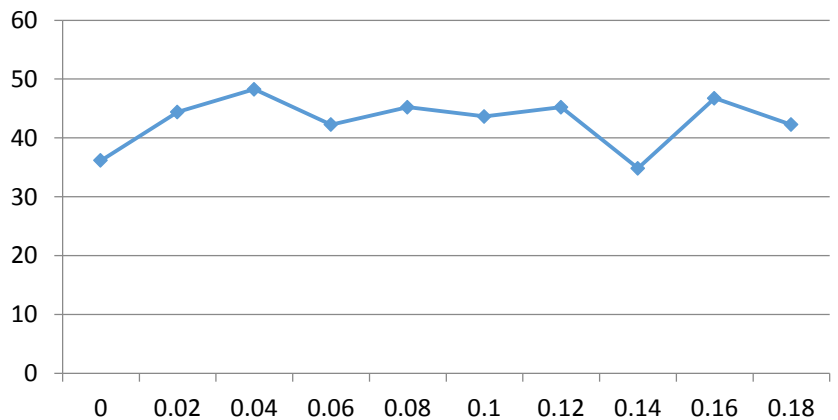


Tabla 20.-Gradiente de Dureza Experimentación 9

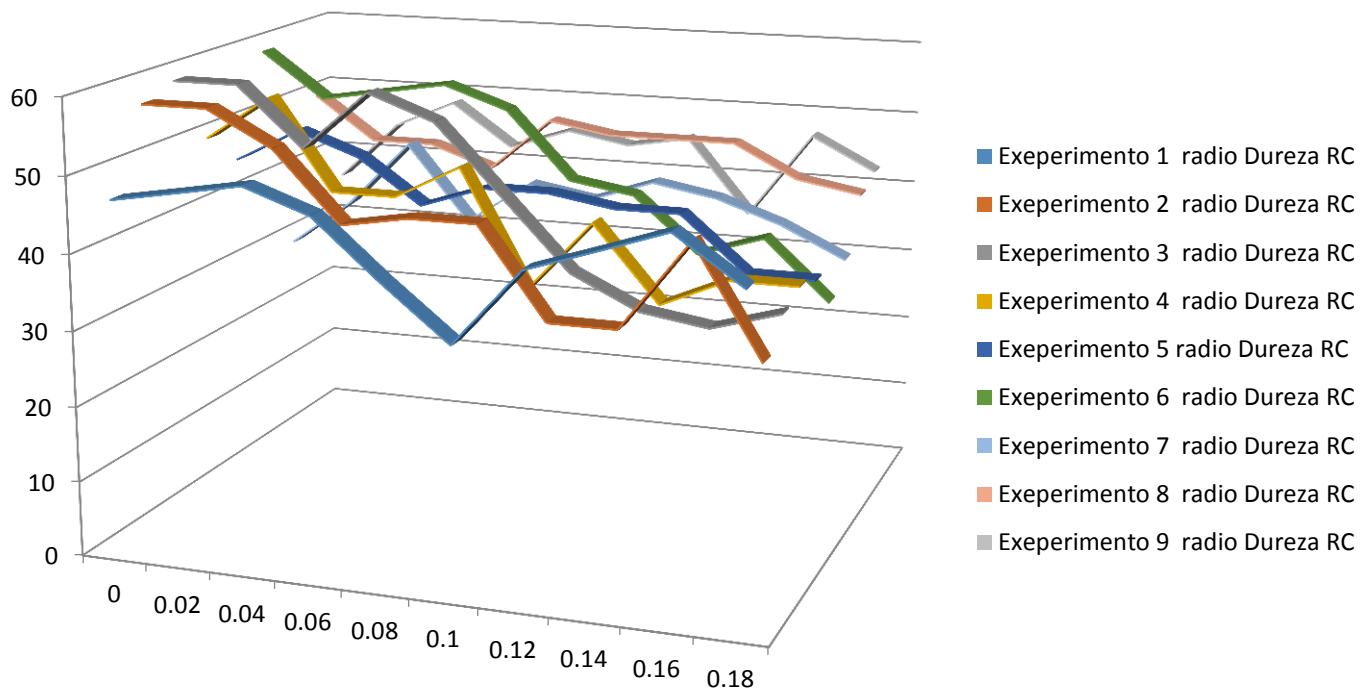


Tabla 21 b.-Gradiente de Dureza de la Experimentación.

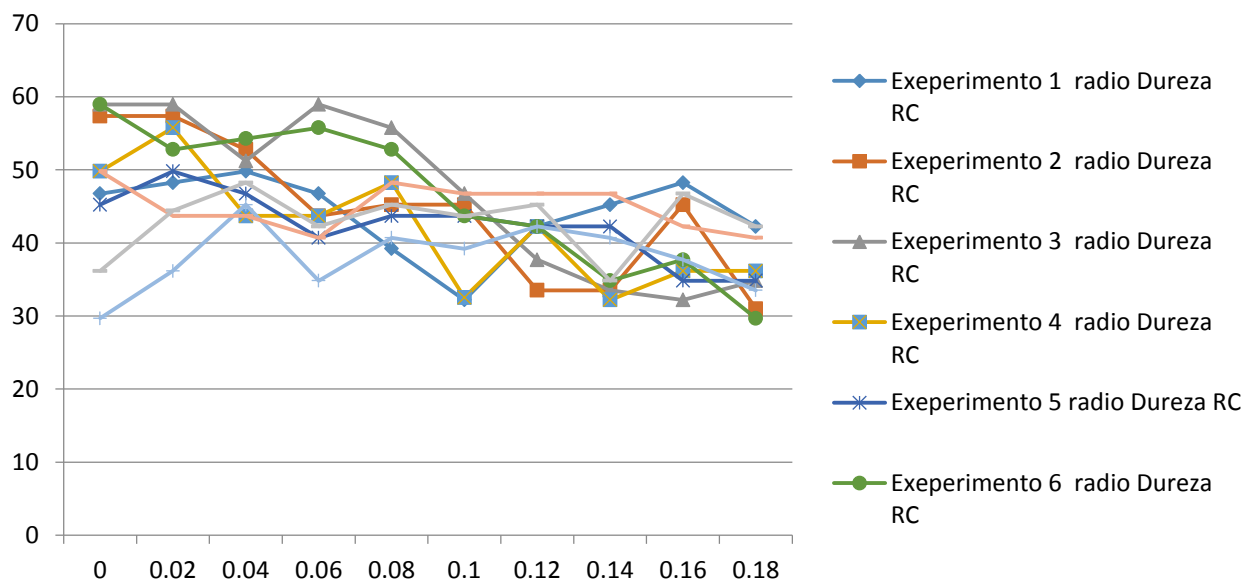


Tabla 21 a.-Gradiente de Dureza de la Experimentación.

## CAPÍTULO 4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El objetivo principal de este estudio es determinar si el señor Barkhausen es un método mediante una Prueba No Destructiva para la detección de capa blanca de martensita. El objetivo es recomendar esta técnica que se puede adoptar por la industria para identificar las piezas con esta condición de martensita reformada.

Este fenómeno de ruido Barkhausen puede dar información por la interacción entre las configuraciones de esfuerzos de las paredes de dominios magnéticos ó la composición micro-estructural. También se puede usar como complemento de la prueba no destructiva por Corriente de Eddy como una fuga de flujo magnético ya que corrientes de Eddy tiene un rango de penetración de material de hasta 6 mm y es usado para materiales ferromagnéticos y No ferromagnéticos.

Como se pudo observar en las gráficas de la figura 39 y 40 hay una buena correlación entre las mediciones de las piezas de línea de producción que están libre del defecto metalúrgico llamado capa blanca de martensita y las mediciones realizadas de la experimentación de este estudio dando una buena confiabilidad de este método como una Prueba No Destructiva para defectos de cambios micro estructurales en materiales ferromagnéticos.

Antes de este estudio se tenía incertidumbre acerca de esta técnica para detección de cambios micro estructurales en el acero, ya que este defecto metalúrgico se puede presentar con diferentes propiedades, tales son: espesor y longitud de martensita reformada por debajo de la superficie; en cuanto a espesor se tenía cierta duda ya que cuando este defecto de capa blanca se presenta con un espesor alrededor de 3micras en adelante, el sensor es capaz de detectarlo sin problema, pero cuando se presenta con espesor de alrededor de 1 micra es muy difícil de diferenciar las mediciones; y en cuanto a la longitud por debajo de la superficie es porque la capa blanca de martensita no siempre se manifiesta de manera continua y eso puede ocasionar alguna medición errónea en alguna zona en específico que se quiera hacer la medición.

Mediante los gradientes de dureza realizados en los experimentos no se ve alguna diferencia notable entre las piezas que contienen más capa blanca de martensita de las que no, ya que con lo mencionado anteriormente se hace muy difícil la medición de dureza exactamente en la capa blanca de martensita reformada. Se recomienda hacer análisis mediante Difracción de Rayos X para determinar si la capa blanca de martensita genera esfuerzos compresivos o de tensión para así correlacionar la dureza de este defecto.

Para reducir o eliminar este defecto metalúrgico denominado capa blanca de martensita reformada se recomienda optimizar los parámetros de corte en el proceso de torneado en duro incluso el probar con otro fluido de corte para ver si hay alguna diferencia.

Mediante la señal obtenida de estas experimentaciones pretendemos correlacionar la amplitud de la señal arrojada por el sensor con los diferentes espesores de capa blanca de tal manera que esta señal generada nos de la magnitud del espesor y longitud de martensita reformada.

Como se mencionó anteriormente viendo el gráfico de la figura 41 se observa claramente que los experimentos caen fuera del rango de la condición de buen estado, viendo la tabla de la figura 38 podemos observar que, mientras el componente tenga más capa blanca de martensita reformada, la señal adquirida por el sensor Barkhausen estará en un rango más lejos de la zona estable; pudiendo concluir con esto que el Ruido Barkhausen es confiable para implementarse como una Prueba No Destructiva para evaluación de defectos internos en materiales ferromagnéticos.

Se concluye que la curva de histéresis es de vital importancia ya que con esto se puede diferenciar entre las propiedades que se quieren identificar mediante esta técnica no destructiva, como por ejemplo diferenciar entre la martensita reformada (White layer) y el quemado por rectificado, mediante la amplitud del lazo de histéresis; ya que la capa blanca de martensita es mucho más dura que la del quemado por rectificado.

## Bibliografía

- Elias, M. I. (2013). Analisis de Ruido de Barkhausen en probetas a Tension.
- Ph..D, P. P. (2006). Residual Stress Measurement in Steel Mill Rolls using Magnetic Barkhausen Noise Analysis .
- Vicent, A. (2015). On the shape of the magnetic Barkhausen noise profile for better revelation of the effect of microstructures on the magnetisation process in ferritic steels.
- Yelbay, H. (210). Non-destructive determination of residual stress state in steel by Magnetic Barkhausen Noise technique.
- Ezio Pippin, Simona Ricci and Luca Callegaro (2000). Barkhausen jumps in a magnetic microstructure  
Citation: Applied Physics Letters (AIP).
- P.Martinez-Ortíz, J.A. Perez-Benitez, J.H. Espina-Hernandez, F, Celayo (2015). Influence of the maximum applied magnetic field on the angular dependence of Magnetic Barkhausen Noise in API5L steels.  
Ubication: Science Direct
- Faezeh Jarrahi,Mehrdad Kashefi , Esmaeel Ahmadzade-Beiraki (2015). An investigation into the applicability of Barkhausen Noise technique in evaluation of machining properties of high carbon steel parts with differents degrees of spheroidization.  
Ubication: Science Direct.
- O. Saquet, J. Chicois, A. Vicent. (1999). Barkhausen noise from plain carbon steels: analysis of the influence of microstructure.  
Ubication: Materials Science and Engineering A269 (1999) 73–82
- Jozef Pal’a, Jan Bydzovsky (2012). Barkhausen noise as a function of grain size in non-oriented FeSi steel.  
Ubication: Science Direct.
- S. Ghanei, M. Khasefi, M. Mazinani. (2013). Comparative study of eddy current and Barkhausen noise non-destructive testing methods in microstructural examination of ferrite-martensite dual-phase steel.  
Ubication: Science Direct.
- Miriam Rocio Neyra Astudillo, Marcelo Núñez Nicolás, Jose Ruzzante, Martin Pedro Gomez, Guido Claudio Ferrari, Linilson Rodrigues Padovese, Maria Isabel lopez. (2015). Correlation between martensitic phase transformation and magnetic Barkhausen noise of AISI 304 steel.  
Ubication: Science Direct.

Ian S. Harrison. (2004). Detecting white layer in hard turned components using non-destructive methods.

Thesis

Claudia Patricia Serna Giraldo, Linilso Rodrigues Padovese. (2007). Ruido magnetico de Barkhausen: un metodo de END para monitorear microestructuras en uniones soldadas.

A. F. Chavez Gonzales, J.A. Perez Benitez, J.H. Espina Hernandez. (2015). Estudio del efecto de la conductividad electrica en el ruido magnetico Barkhausen utilizando el modelo microscopico de RMB.

Ubication: Articulo No. IE-4. 15 Congreso nacional de ingenieria electromecanica y de sistemas.

Pedro Martinez Ortiz, Jose Hiram Espina Hernandez. (2010). Sistema de medicion de Ruido magnetico Barkhausen en aceros.

Tesis para obtener grado de Maestro en Ciencias en Ingenieria Electronica.

V. Moorthy, S. Vaydyanathan, T. Jayakumar, Baldev Raj. (1977). Microstructural characterization of quenched and tempered 0.2% carbon steel using magnetic Barkhausen Noise analysis.

Ubication: Journal of Magnetism and magnetic materials.

M. Neslusán, T. Hrabovsky, M. Cilliková, A. Micietova. (2015). Monitoring of hard milled surfaces via barkhausen noise technique.

Ubication: Science Direct.

Mohamed Mehemed Blaow, Brian A. Shaw. (2014). Magnetic Barkhausen Noise Profile Analysis: Effecto of excitation field strength and detection coil sensitivy.

Ubication: Scientific Research.

jozef, Pal'á, Elemir Usak. (2015). New paraeters in adaptive testing of ferromagnetic materials utilizing magnetic Barkhausen noise.

Ubication: Science Direct.

M. Vashista, V. Moorthy. (2015). On the shape of the magnetic Barkhausen Noise profile for better revelation of the effect of microstructures on the magnetisation procces in ferritic steels.

Ubication: Journal of Magnetism and magnetic materials. (Science Direct)

P.Martinez Ortiz, J.A. Perez Benitez, J.H.Espinza Hernandez, F. Caleyó, J.M. Hallen.(2014). On the estimation of the magnetic easy axis in pipeline steels using magnetic Barkhausen noise.

Ubication: Journal of Magnetism and magnetic materials. (Science Direct)

Neelman G. Prabhu Gaunkar, Orfeas Kypris, I.C. Nlebedim, David C.

Jiles.(2014).Optimization of sensor design for Barkhausen noise measurement using finite element analysis.

Ubication: Electrical and computer engineering publications.

Freddy A. Franco G., Linilson R. Padovese. (2007). Ruido magnetico de Barkhausen: ensayo no destructivo para la evaluacion de grados de dureza en aceros.

D.M. D'Addona, Sunil J Raykan.(2015). Analysis of surface roughness in hard turning using wiper insert geometry.

Kevin P.O'brien and M.B. Weissman.(1994). Statical characterization of Barkhausen Noise.

JJJun Wu, Roumen H. Petrov, Meysam Naeimi, Zili Li, Rolf Dollevoet, Jilt Sietsma.(2016). Laboratory simulation of martensite formation of white etching layer in rail steel.

D.M. Clatterbuck, V.J. Garcia, M.J.Jhonson, D.C. Jiles. (2000) Modeling of the magnetic Barkhausen noise effect.  
Ames Laboratory and center for non destructive evaluation. Iowa State University.

D.A. Kaminski and D.C. Jiles. (1996). Application of Barkhausen effect measurements for detection of near surface stress.  
Ubication: Journal of applied physics.

C.C.H. Lo, S.J. Lee, L.C. Kerdu, and D.C. Jiles. (2002). Examination of the relationship between the parameters of Barkhausen effect model and microstructure of magnetic materials.

Luca Callegaro, Ezio Puppini and Simona Ricci. (2001). Barkhausen noise and size effects in magnetic microstructures.

# LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

<b>Figura 1</b>	Desperdicio de material por Martensita Reformada
<b>Figura 2</b>	Flechas de transmisión
<b>Figura 3</b>	Prueba No Destructiva por Inspección Visual
<b>Figura 4</b>	Prueba No Destructiva por Líquidos Penetrantes (procedimiento)
<b>Figura 5</b>	Prueba No Destructiva por Partículas Magnéticas (agrupamiento de partículas a causa de grieta)
<b>Figura 6</b>	Principio de Prueba No Destructiva por Corrientes de Eddy
<b>Figura 7</b>	Prueba No Destructiva por Difracción de Rayos X
<b>Figura 8</b>	Prueba No Destructiva por Ultrasonido
<b>Figura 9 a</b>	Dominios Magnéticos
<b>Figura 9 b</b>	Dominios Magnéticos orientados por un campo magnético externo
<b>Figura 10</b>	Lazo de Histéresis de un material ferromagnético
<b>Figura 11</b>	Flecha principal
<b>Figura 12</b>	Proceso de producción de flechas de transmisión
<b>Figura 13</b>	Estructura Martensítica
<b>Figura 14</b>	Efecto del contenido de carbono sobre la temperatura de inicio de transformación de martensita
<b>Figura 15 a</b>	Muestra sin capa blanca de martensita reformada
<b>Figura 15 b</b>	Muestra con capa blanca de Martensita Reformada
<b>Figura 16</b>	Equipo de medición Barkhausen
<b>Figura 17</b>	Efectos de Esfuerzos residuales en el ruido Barkhausen
<b>Figura 18</b>	Difractómetro de Rayos X para medir esfuerzos residuales
<b>Figura 19</b>	Efectos de microestructura en el ruido Barkhausen
<b>Figura 20</b>	Metodología planteada.
<b>Figura 21</b>	Esquema de flecha de transmisión. Zonas maquinadas con parámetros agresivos en los experimentos (zona 4, 5 y 6)
<b>Figura 22</b>	Proceso de montaje para evaluación microestructural
<b>Figura 23 a</b>	Inserto antes de la experimentación
<b>Figura 23 b</b>	Inserto después de la experimentación
<b>Figura 24 a</b>	Cara Brida a 500x de resolución.
<b>Figura 24 b</b>	Radio Brida a 500x de resolución.
<b>Figura 25 a</b>	Cara Brida a 500x de resolución
<b>Figura 25 b</b>	Radio brida a 500x de resolución
<b>Figura 26 a</b>	Cara brida a 100x de resolución.
<b>Figura 26 b</b>	Cara brida a 500x de resolución
<b>Figura 26 c</b>	Radio brida a 100x de resolución
<b>Figura 26 d</b>	Radio brida a 500x de resolución
<b>Figura 27 a</b>	Cara brida a 100x de resolución.
<b>Figura 27 b</b>	Cara brida a 500x de resolución
<b>Figura 27 c</b>	Radio brida a 100x de resolución
<b>Figura 27 d</b>	Radio brida a 500x de resolución



<b>Figura 28 a</b>	Cara brida a 100x de resolución.
<b>Figura 28 b</b>	Cara brida a 500x de resolución
<b>Figura 28 c</b>	Radio brida a 100x de resolución.
<b>Figura 28 d</b>	Radio brida a 500x de resolución
<b>Figura 29 a</b>	Cara brida a 100x de resolución.
<b>Figura 29 b</b>	Cara brida a 500x de resolución
<b>Figura 29 c</b>	Radio brida a 100x de resolución
<b>Figura 29 d</b>	Radio brida a 500x de resolución
<b>Figura 30 a</b>	Cara brida a 100x de resolución
<b>Figura 30 b</b>	Cara brida a 500x de resolución
<b>Figura 30 c</b>	Radio brida a 100x de resolución.
<b>Figura 30 d</b>	Radio brida a 500x de resolución
<b>Figura 31 a</b>	Cara brida a 100x de resolución
<b>Figura 31 b</b>	Cara brida a 500x de resolución.
<b>Figura 31 c</b>	Radio brida a 100x de resolución
<b>Figura 31 d</b>	Radio brida a 500x de resolución
<b>Figura 32 a</b>	Radio brida a 500x de resolución.
<b>Figura 32 b</b>	Cara brida a 500x de resolución.
<b>Figura 34</b>	Imágenes termo-Graficas del experimento 2, S= 230 m/min; f= 0.07 mm/rev; ap= 0.3 mm
<b>Figura 35</b>	Imágenes termo-Graficas del experimento 4, S= 230 m/min; f= 0.3 mm/rev; ap= 0.3 mm
<b>Figura 36</b>	Imágenes termo-Graficas del experimento 7, S= 152 m/min; f= 0.05 mm/rev; ap= 0.2 mm
<b>Figura 37</b>	Imágenes termo-Graficas del experimento 9, S= 152 m/min; f= 0.05 mm/rev; ap= 0.2 mm
<b>Figura 38</b>	Voltaje y frecuencia de Barrido
<b>Figura 39</b>	Mediciones de Ruido Barkhausen en 15 piezas de línea de Producción y los 9 experimentos.
<b>Figura 40</b>	Experimentacion de ruido Barkhausen

<b>Tabla 1</b>	Tabla de factores utilizados en el proceso de corte
<b>Tabla 2</b>	Parámetros de corte en experimento 1.
<b>Tabla 3</b>	Parámetros de corte en experimento 2.
<b>Tabla 4</b>	Parámetros de corte en experimento 3
<b>Tabla 5</b>	Parámetros de corte en experimento 4.
<b>Tabla 6</b>	Parámetros de corte en experimento 5
<b>Tabla 7</b>	Parámetros de corte en experimento 6.
<b>Tabla 8</b>	Parámetros de corte en experimento 7.
<b>Tabla 9</b>	Parámetros de corte en experimento 8
<b>Tabla 10</b>	Parámetros de corte en experimento 9
<b>Tabla 11</b>	Tabla de resultados de los experimentos
<b>Tabla 12</b>	Gradiente de Dureza Experimentación 1
<b>Tabla 13</b>	Gradiente de Dureza Experimentación 2
<b>Tabla 14</b>	Gradiente de Dureza Experimentación 3
<b>Tabla 15</b>	Gradiente de Dureza Experimentación 4
<b>Tabla 16</b>	Gradiente de Dureza Experimentación 5
<b>Tabla 17</b>	Gradiente de Dureza Experimentación 6
<b>Tabla 18</b>	Gradiente de Dureza Experimentación 7
<b>Tabla 19</b>	Gradiente de Dureza Experimentación 8
<b>Tabla 20</b>	Gradiente de Dureza Experimentación 9
<b>Tabla 21 a</b>	Gradiente de Dureza de la Experimentación.
<b>tabla 21 b</b>	Gradiente de Dureza de la Experimentación.